

ANALYSE DE NOUVEAUX MODÈLES DE SYMBIOSE INDUSTRIELLE AXÉS SUR LA TRANSFORMATION DE
L'ÉTHANOL POUR LA ZONE INDUSTRIALO-PORTUAIRE VARENNES-CONTRECOEUR

Par
Arnaud Chartier

Essai présenté au Centre universitaire de formation
en environnement et développement durable en vue
de l'obtention du grade de maîtrise en environnement (M. Env.)

Sous la direction de Marc-J. Olivier

MAITRISE EN ENVIRONNEMENT
UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE

Octobre 2019

SOMMAIRE

Mots-clés : Symbiose industrielle, économie circulaire, biodiésel, éthylène, éthanol, zone industrialo-portuaire, Varennes, Contrecoeur, huiles usées, matériaux biosourcés

L'objectif principal de cet essai vise à développer et évaluer de nouveaux modèles exportables de parcs industriels ayant pour cœur une usine de production d'éthanol en appliquant les principes de la symbiose industrielle. Cet essai a développé ces scénarios en lien avec l'usine de Greenfield Global et de la zone industrialo-portuaire Varennes-Contrecoeur. Pour faire cette évaluation, il faut, dans un premier temps, brosser un portrait du développement actuel du parc industriel de Varennes et des environs. Dans un second temps plus important, puisque le contexte le permet, une analyse multicritère est réalisée sur les scénarios de synergies complémentaires proposés et vient ainsi bonifier et pérenniser la symbiose territoriale déjà présente.

Actuellement, le modèle d'affaires de l'industrie de l'éthanol tant canadien qu'américain est largement dépendant des obligations gouvernementales, forçant le mélange d'une fraction minimale de 5 % d'alcool éthylique à l'essence légère. Ces obligations sont une façon de diminuer le bilan national d'émissions de gaz à effet de serre. Or, de plus en plus de pays s'apprêtent à bannir les véhicules à motorisation conventionnelle et il est possible que le Québec, un jour, emboîte le pas. L'industrie de l'éthanol a donc un besoin imminent de se réinventer.

Des recommandations sont émises afin de faciliter le développement et la mise en place de symbiose industrielle au Québec. L'industrie agroalimentaire québécoise devrait revoir ses façons de faire en gestion des matières résiduelles lipidiques. En même temps, l'industrie de l'éthanol n'ayant d'autre choix que de se réinventer devrait réaliser les études de transformation nécessaires en misant sur le maintien de la carboneutralité durant les décennies de transition énergétique à venir. Finalement, le gouvernement du Québec, en possession d'informations privilégiées avec les certificats d'autorisation envoyés au ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques, est dans une position de choix pour devenir un acteur de premier rôle dans l'amorce des démarches de symbioses industrielles.

L'évaluation multicritère, quoiqu'imparfaite, démontre sans équivoque que la production de biodiésel au Québec serait une option intéressante à explorer plus en profondeur pour réorienter l'industrie de l'éthanol. Dans d'autres contextes, plus chaud surtout, il pourrait être possible de produire de l'éthylène biosourcé afin d'alimenter une nouvelle industrie du plastique carboneutre. De plus, les contraintes d'approvisionnement en matières premières ont permis de cibler d'autres régions du monde pour exporter les modèles développés de l'essai.

REMERCIEMENTS

Tout d’abord, je dois impérativement remercier mon directeur d’essai, Marc Olivier, sans qui ce travail aurait été impossible. Marc m’a permis non seulement de développer des compétences en rédaction, il m’a aussi donné le gout d’écrire et de pousser cet exercice intellectuel jusqu’à ses limites. Il a été présent à tous les moments du parcours pour répondre aux questions et aux quelques demandes d’orientation.

Je tiens à remercier tous mes anciens collègues de l’Administration portuaire de Montréal, à qui, même s’ils ne le savent pas, je dois l’idée maitresse de l’essai. J’en profite pour saluer Claude Deschambault et Hani Matta pour les informations qu'ils ont fournies et leur collaboration.

Je souhaite aussi remercier tout le personnel de qualité, d’enseignement et de support, qui a fait en sorte que mes années à l’Université de Sherbrooke furent remarquables.

Finalement, je lève mon chapeau à mes amis et membres de la famille pour avoir partagé avec moi les moments heureux de mon parcours académique et l'appui dans ceux plus difficiles. C’est grâce à eux si je suis rendu ici, aujourd’hui.

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION	1
1. MISE EN CONTEXTE	4
1.1 Origine du projet d’essai	4
1.2 Portrait de Varennes et des alentours	5
1.2.1 Le parc scientifique et technologique	5
1.2.2 Le parc métallurgique et technique	5
1.2.3 La zone industrialo-portuaire	5
1.2.4 Autour de la ZIP	6
1.3 Liens de l’entreprise Greenfield Global dans le contexte régional	8
2. SYMBIOSE INDUSTRIELLE	11
2.1 Concept	11
2.2 Les échanges.....	12
2.3 Synergies	13
2.3.1 Synergies de substitution	13
2.3.2 Synergies de mutualisation	14
2.4 Modes de formation d’une symbiose	15
2.5 Modèles de projet de symbiose industrielle	16
2.6 Démarche de création d’une symbiose.....	16
2.7 Avantages et limites de la symbiose industrielle	17
2.7.1 Aspect technique	18
2.7.2 Apport de la gouvernance	18
2.7.3 Limite économique.....	18
2.7.4 Angle culturel et social	19
2.7.5 Impact environnemental	19
2.8 L’adoption de la symbiose industrielle au Québec	19

3.	L'ÉTHANOL.....	21
3.1	Propriétés physiques.....	21
3.2	Propriétés chimiques.....	21
3.3	Production.....	22
4.	BIODIÉSEL MARIN.....	26
4.1	Besoin répondu	27
4.2	Opportunité de marché.....	29
4.3	Description du scénario.....	32
4.4	Train technologique proposé	32
4.5	Produits	35
4.6	Transestérification par catalyse hétérogène.....	37
4.7	Approvisionnement.....	38
4.8	Les boues municipales au Québec	40
4.9	Capacité de distribution	40
4.9.1	Biodiésel	40
4.9.2	Glycérol.....	41
5.	ÉTHYLÈNE BIOSOURCÉ	42
5.1	Production et marché.....	42
5.2	Déshydratation catalytique de l'éthanol.....	43
5.3	Réacteurs.....	44
5.4	Catalyseurs	45
5.5	Technologies industrielles actuelles.....	45
5.6	Train technologique proposé	46
5.7	Séparation	47
5.8	Purification	47
5.9	Sensibilité de l'éthanol	47

6.	PONDÉRATION ET ANALYSE	48
6.1	Pondération.....	48
6.2	Technoéconomique.....	48
6.2.1	Faisabilité technique	48
6.2.2	Sensibilité économique	49
6.3	Environnemental	50
6.3.1	Caractéristiques physiques de l'environnement.....	50
6.3.2	Caractéristiques du vivant.....	50
6.4	Sociétal	50
6.5	Exportabilité du modèle	51
7.	ANALYSE DU BIODIÉSEL.....	52
7.1	Technoéconomique.....	52
7.1.1	Faisabilité technique	52
7.1.2	Sensibilité économique	53
7.2	Environnemental	55
7.2.1	Caractéristiques physiques de l'environnement.....	55
7.2.2	Caractéristiques du vivant.....	56
7.2.3	Pérennité ou résilience du modèle	56
7.3	Sociétal	57
7.4	Exportabilité du modèle	57
7.5	Présentation suggérée	59
8.	ANALYSE DE L'ÉTHYLÈNE	61
8.1	Technoéconomique.....	61
8.1.1	Faisabilité technique	61
8.1.2	Sensibilité économique	64
8.2	Environnemental	67

8.2.1	Caractéristiques physiques de l’environnement.....	67
8.2.2	Caractéristiques du vivant.....	67
8.2.3	Pérennité ou résilience du modèle	68
8.3	Sociétal	69
8.4	Exportabilité du modèle	69
8.5	Présentation suggérée	71
9.	ÉVALUATION ET ATTRIBUTION DES COTES	72
9.1	Évaluation du biodiésel	72
9.2	Évaluation de l’éthylène biosourcé	72
10.	LIMITES DE L’ESSAI	75
10.1	Collaboration partielle des acteurs	75
10.2	Les projections et le peut-être	75
10.3	Réponse à des enjeux.....	75
10.4	Retour sur la méthodologie.....	76
10.5	Les changements climatiques dans tout ça?.....	76
11.	RECOMMANDATIONS.....	77
11.1	Recommandation à l’industrie agroalimentaire	77
11.2	Recommandation à l’industrie de l’éthanol.....	78
11.3	Recommandation au Gouvernement du Québec	78
	CONCLUSION	80
	RÉFÉRENCES	82
	ANNEXE 1 – PLANS D’URBANISME DE VARENNES	91
	ANNEXE 2 – AVANTAGES DE LA SYMBIOSE INDUSTRIELLE	93
	ANNEXE 3 – ÉTHYLÈNE	95
	ANNEXE 4 – MATIÈRES RÉSIDUELLES DE L’INDUSTRIE AGROALIMENTAIRE	98

LISTE DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1.1 : Procédé de production d'éthanol de première génération	8
Figure 1.2 : Symbiose industrielle actuelle autour de Greenfield Global aux installations de Varennes ...	10
Figure 2.1 : Bouclage des flux de l'économie circulaire	12
Figure 2.2 : Flux de matières et d'énergie à Kalundborg.....	15
Figure 2.3 : Faisabilité économique d'une synergie	18
Figure 3.1 : Production mondiale d'éthanol depuis 1975	23
Figure 3.2 : Production mondiale d'éthanol carburant en million de gallons américains en 2018	24
Figure 4.1 : Panache de fumée noire sortant d'un navire en très mauvaise condition de brûlage du carburant	28
Figure 4.2 : Augmentation de la taille des navires construits selon l'âge	29
Figure 4.3 : Tirant d'eau (m) en fonction du port en lourd (milliers de tonnes) de vraquiers solides	30
Figure 4.4 : Potentiel de réduction de GES de différentes technologies	31
Figure 4.5 : Réaction de transestérification	32
Figure 4.6 : Procédé d'une transestérification à deux étapes.....	34
Figure 4.7 : Diagramme d'écoulement d'une bioraffinerie municipale	39
Figure 5.1 : Principaux produits dérivés de l'éthylène et leurs applications.....	42
Figure 5.2 : Marché des précurseurs d'éthylène en 2016.....	43
Figure 5.3 : Projection du marché des précurseurs d'éthylène en 2021	43
Figure 7.1 : Les 10 plus grands cheptels bovins dans le monde en 2017	58
Figure 7.2 : Les 10 plus grands élevages porcins dans le monde en 2017	58
Figure 7.3 : Répartition mondiale de la production de canne à sucre en 2000 (kg par hectare)	59
Figure 7.4 : Symbiose industrielle proposée qui intègre la production de biodiésel aux installations de Varennes.....	60
Figure 8.1 : Seuil de rentabilité de l'éthylène en fonction du prix de l'éthanol et de la portion de production en valorisation énergétique	65
Figure 8.2 : Prix de l'éthylène en USD/t entre 1986 et 2018 aux États-Unis.....	65
Figure 8.3 : Prix de l'éthanol entre 2007 et 2019 aux États-Unis (USD/GAL).....	66
Figure 8.4 : Localisation des dépôts et mines de fer à travers le monde.....	70
Figure 8.5 : Localisation de la production de maïs à travers le monde en 2000 (kg par hectare)	70
Figure 8.6 : Symbiose industrielle proposée avec la production d'éthylène aux installations de Varennes.....	71
Tableau 1.1 : Entreprises d'intérêt et leur vocation actuelle dans la ZIP varennoise	6
Tableau 1.2 : Entreprises d'intérêt et leur vocation actuelle dans le parc industriel de Contrecœur.....	7
Tableau 1.3 : Synthèse des types d'entreprises composant l'axe Varennes-Contrecœur	8
Tableau 2.1 : Trois niveaux d'application de l'écologie industrielle.....	12
Tableau 2.2 : Types d'échanges de sous-produits dans une symbiose industrielle	13
Tableau 2.3 : Modes de formation d'une symbiose industrielle.....	15
Tableau 2.4 : Modèles de projet de symbiose industrielle en fonction de leur mise en œuvre	16
Tableau 2.5 : Étapes d'implantation d'une symbiose industrielle	17
Tableau 3.1 : Propriétés physiques de l'éthanol	21
Tableau 4.1 : Âge moyen des véhicules de transport conventionnels.....	27
Tableau 4.2 : Flux annuel des réactifs et des produits principaux	35
Tableau 4.3 : Réactifs et produits de transestérification potentiellement obtenus à l'échelle mondiale d'éthanol.....	36
Tableau 4.4 : Synthèse des avantages et inconvénients entre catalyseurs homogènes et hétérogènes...	37

Tableau 5.1 : Synthèse des technologies de déshydratation de l'éthanol vers l'éthylène	44
Tableau 5.2 : Conditions d'opérations de déshydratation de l'éthanol pour faire de l'éthylène	46
Tableau 6.1 : Cotes de pondérations et leur justification	48
Tableau 7.1 : Calcul du seuil de rentabilité des H&G	54
Tableau 8.1 : Énergie potentielle de la SÉMECS pour une population de 250 000 habitants	63
Tableau 8.2 : Énergie nécessaire pour déshydrater l'éthanol en éthylène.....	63
Tableau 9.1 : Évaluation des modèles de symbioses industrielles analysés selon leurs aspects.....	74

LISTE DES ACRONYMES, DES SYMBOLES ET DES SIGLES

% p/p	concentration massique
% v/v	concentration volumique
ACV	Analyse de cycle de vie
APM	Administration portuaire de Montréal
CTTÉI	Centre de Transfert technologique en Écologie industrielle
CUFE	Centre universitaire de formation en environnement et développement durable
ÉC	Économie circulaire
EÉAG	Esters éthyliques d'acides gras
ÉIT	Écologie industrielle territoriale
EMAG	Esters méthyliques d'acides gras
FAO	<i>Food and Agriculture Organization of the United Nations</i>
GAL	gallon américain
GES	Gaz à effet de serre
GNL	Gaz naturel liquéfié
GPL	Gaz de pétrole liquéfié
H&G	Huiles et graisses
ha	hectare
HEC	Hautes études commerciales
HFO	<i>Heavy fuel oil</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
IFPEN	Institut français du pétrole énergie nouvelle
IMO	<i>International Maritime Organization</i>
INRS	Institut national de la recherche scientifique
kg	kilogramme
LSFO	<i>Low sulfur fuel oil</i>
MARPOL	Convention internationale pour la prévention de la pollution maritime par les navires

MDO	<i>Maritime diesel oil</i>
MRC	Municipalité régionale de comté
Mtep	mégatonne équivalente de pétrole
ONU	Organisation des Nations unies
PET	Polyéthylène téréphtalate
ppm	partie par million
SÉMECS	Société d'économie mixte de l'est de la couronne sud
SI	Symbiose industrielle
t	tonne
TJ	térajoule
UNCTAD	<i>United Nations Conference on Trade and Development</i>
USD	dollar américain
UVED	Université virtuelle environnement et développement durable
ZIP	Zone industrialo-portuaire

LEXIQUE

Boues primaires	Dépôts récupérés par une simple décantation des eaux usées (dans les décanteurs par exemple). Elles présentent des concentrations élevées en matières minérales (sable, terre...), mais aussi en matière organique boueuse physicochimique (Encyclopaedia Britannica, s. d.).
Boues secondaires	Synonyme de boues activées, ce sont les dépôts de microorganismes ayant dégradé la matière biologique des eaux usées. (Encyclopaedia Britannica, s. d.).
Exportabilité	Traduction libre de l'anglais <i>exportability</i> qui définit le caractère exportable d'un bien. Dans le cas de l'essai, il s'agit d'exporter un modèle (Merriam-Webster, s. d.).
Zéro des cartes	Pour que les profondeurs indiquées sur une carte soient utiles à la navigation, elles sont établies par rapport à un niveau de basses eaux appelé niveau de référence, ou zéro hydrographique. Généralement, le zéro des cartes (zéro hydrographique) est choisi de manière à ce que le niveau d'eau soit rarement inférieur et la profondeur rarement moindre que ce qui est indiqué sur la carte. (Pêches et Océans Canada, 2016)

INTRODUCTION

Le monde industriel est un objet dynamique. Il repose sur des ensembles technologiques en évolution depuis trois siècles, subit des révolutions économiques, répond aux pressions politiques, impose sa force aux sociétés et aux ressources. Aujourd'hui, le pan énergétique qui l'anime approche de la crise. De plus en plus de scientifiques lèvent le ton, une part croissante de la gouvernance l'affirme et les forces sociales montantes l'exigent : il faut appliquer une meilleure utilisation des ressources naturelles et abandonner les technologies qui reposent sur les ressources fossiles.

« Il y aura décroissance quoi qu'il en soit. Soit on l'organise, et ça fait moins mal, soit on la subit de la nature, et là, ça va être très, très violent. » Tels sont les propos de Yves-Marie Abraham, professeur agrégé à l'École des hautes études commerciales (HEC), prononcés au micro de Radio-Canada lors du Premier festival de la décroissance. (Abraham, 2018) La décroissance est présentement un des sujets chauds dans la sphère environnementale francophone et plus particulièrement sur la scène québécoise (Paquette, 2018). L'intérêt est aussi présent ailleurs dans le monde. En 2016, un groupe interparti du parlement britannique se questionne sur les limites de la croissance et demande une revue des travaux du Club de Rome *Limits to Growth* (Meadows, Meadows, Randers et Behrens, 1972). Cette revue conclut que la société, 40 ans plus tard, suit toujours le scénario de base du rapport original dans lequel un effondrement de la productivité et de la qualité de vie est à prévoir (Jackson et Webster, 2016).

Subséquemment, ce travail s'inscrit dans une vision parallèle à celle de monsieur Abraham. Plus spécifiquement, il s'agit d'explorer quelques étapes de la transition énergétique inscrites dans la décroissance pour un ensemble industriel régional. Cette transition passe par des propositions interreliées de technologies affranchies des énergies fossiles, donc par des produits aux usages multiples dont la production s'approche de la carboneutralité. Ainsi, dans un contexte d'effondrement pétrolier, les résultats de la présente étude pourraient être tout aussi valides.

Bon nombre de pays industrialisés s'apprêtent à bannir les véhicules à moteur conventionnel de leurs routes : Allemagne, Danemark, France, Norvège, Pays-Bas, Royaume-Uni. Même l'Inde initie ce mouvement en Asie. Quand ce n'est pas un pays entier, ce sont des villes qui s'y engagent pour leur centre-ville : Paris, Madrid, Mexico et Athènes. L'idée fait son chemin à Montréal. Le remplacement de la motorisation pour réaliser la transition énergétique, est-ce pour 2025, 2030, 2035 ou 2040 (Bergeron, 2016) (Dupaul, 2019)? Le présent travail cible l'extension du concept de symbiose industrielle à une usine qui produit actuellement de l'éthanol d'origine végétale, le principal additif de l'essence légère. L'étude de cas se concentre sur le parc industriel de la ville de Varennes et dans l'axe industrialo-portuaire

s'étendant jusqu'à Contrecoeur. Il ne cherche pas à révolutionner les applications de l'économie actuelle, mais explore les façons de faire de l'industrie si elle doit se reconvertir, donc travailler en amont avec les procédés de production plutôt que d'hériter en bout de course d'impacts environnementaux à tempérer ou à remédier. Mais voilà, comment maintenir en activité l'usine au cœur d'un parc d'écologie industrielle lorsque la demande pour l'éthanol carburant s'amenuise, et même lorsque la technologie des moteurs à combustion devient obsolète avec le bannissement du moteur à essence légère?

L'objectif principal de cette étude consiste donc à développer, proposer et évaluer de nouveaux modèles exportables d'une symbiose industrielle basée autour de la production d'éthanol au Québec. Ces modèles visent un développement ou une réorganisation d'une partie de la zone industrialo-portuaire (ZIP) de Varennes-Contrecoeur. L'usine d'éthanol Greenfield Global évolue dans un environnement dynamique et a déjà mis en place un ensemble d'échanges de flux de matériaux avec ses voisins industriels à l'extérieur de ses clôtures. Pour faire cette évaluation, il faut dans un premier temps brosser un portrait du développement actuel du parc industriel de Varennes et des environs. Dans un second temps plus important, puisque le contexte le permet, il faut réaliser une analyse multicritère sur deux propositions de scénarios de synergies complémentaires pour bonifier et pérenniser la symbiose territoriale déjà présente. Les critères importants à prendre en considération sont : la faisabilité technoéconomique, les impacts positifs et négatifs sur l'environnement, les impacts sur la société et l'exportabilité des modèles.

L'information nécessaire pour aborder les différentes thématiques en lien avec cet essai se découpe en trois grandes catégories. Premièrement, il y a la littérature médiatique et gouvernementale qui a trait à la mise en contexte, aux problématiques et aux besoins répondus par les procédés. Cela comprend les articles de journaux quotidiens, hebdomadaires, des sites spécialisés dans certains domaines comme l'environnement, la finance, ou le monde portuaire et maritime. Deuxièmement, la littérature scientifique permet de répondre aux questions liées aux technicités et à la faisabilité des procédés. Les sources consultées comprennent des articles scientifiques publiés dans des revues spécialisées crédibles. Finalement, pour ficeler la direction que prend l'essai, les idées avancées sont supportées par la littérature plus académique, dont des notes de cours en gestion de matières résiduelles, des formations spécialisées en écologie industrielle et des essais réalisés par des étudiants de la maîtrise en environnement de l'Université de Sherbrooke. C'est aussi à partir de cette littérature que sont plus spécifiquement formulés les critères d'analyses des procédés.

Cet essai comprend deux grands axes. D'abord, le cadre théorique présente la problématique et actualise les différents sujets abordés. C'est aussi là que sont suggérées des solutions potentielles en lien avec la

problématique. Par la suite vient la discussion où les modèles suggérés sont analysés et évalués. Des recommandations en lien avec des enjeux soulevés par l'analyse sont apportées. Une brève conclusion termine l'essai. La mise en contexte du premier chapitre place le cadre industriel de l'essai dans le moment présent. S'en suit une présentation de concepts de base en symbiose industrielle. Le lecteur entre dans les détails du sujet au chapitre trois portant sur l'éthanol. C'est là que sont expliquées les propriétés de l'éthanol, comment il est produit, à quoi ressemble le marché mondial et quels sont les défis auxquels les producteurs font face. Suite à ces portraits viennent les chapitres quatre et cinq où sont proposés des modèles industriels nécessitant un approvisionnement de grande échelle en éthanol. Ces modèles sont développés dans le but de répondre à une problématique environnementale. Le chapitre six porte sur la méthodologie employée pour réaliser les analyses portées aux chapitres sept et huit. Ces analyses ont pour sujet les modèles proposés précédemment, soit le biodiésel et l'éthylène. Le chapitre neuf complète l'exercice en attribuant des cotations aux éléments importants des deux modèles. L'essai étant un exercice limité dans le temps n'a pas d'autre choix que d'être limité dans son envergure. Ces limites sont présentées au chapitre dix. Finalement, le chapitre onze termine sur les recommandations faites à différents paliers de gouvernances.

1. MISE EN CONTEXTE

Avant de regarder en détail les principaux points entourant le projet, quelques précisions s'imposent pour comprendre sa genèse. Les éléments marquants repris dans cette section apportent les bases nécessaires à une bonne compréhension du sujet pour situer les objectifs de cet essai.

1.1 Origine du projet d'essai

En 2000, le projet d'une usine de production d'éthanol par maïs-grain est annoncé par le Gouvernement québécois. Des subventions viennent appuyer sa mise en place, des ententes sont conclues pour son approvisionnement, les équipements sont rodés, puis l'inauguration a lieu en juin 2007 (Cornelissen, 2007). Depuis lors, au fur et à mesure que de nouvelles entreprises viennent s'y greffer, un noyau d'écologie industrielle se développe autour de l'usine devenue Greenfield Global à Varennes.

Un des derniers éléments de l'écoparc de Varennes est l'unité de biométhanisation qui dessert la région. Dans le cadre du programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage (PTMOBC), le ministère de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques (MELCC) offre un soutien financier au milieu municipal et au secteur privé pour l'installation d'infrastructures de ce type (MELCC, 2019). C'est en 2010 que la Société d'économie mixte de l'est de la couronne sud (SÉMECS) annonce son projet d'usine de biométhanisation de matières résiduelles. Cette société est un partenariat public-privé des municipalités régionales de comtés (MRC) de La Vallée-du-Richelieu, Marguerite-D'Youville, de Rouville ainsi que de Biogaz EG, une entreprise formée par Greenfield Global et Groupe Valorr (Martel, 2018). L'usine de biométhanisation de Varennes, construite en face de l'usine d'éthanol de Greenfield Global, dessert 270 000 habitants et détourne de 40 000 à 50 000 tonnes de matières résiduelles putrescibles par année (Greenfield Global, 2017). Cette usine produit 3,25 millions de m³ de méthane en grande partie carboneutre (MELCC, 2014a). Cette capacité de production de méthane peut être doublée depuis que la ville de Longueuil a choisi de traiter ses matières résiduelles organiques à la SÉMECS (Lévesque, 2019, 30 janvier). De plus, le digestat sortant de l'usine est un amendement et un fertilisant de qualité offert aux agriculteurs du groupe Pro-Éthanol, eux qui vendent déjà du maïs-grain à Greenfield Global. C'est là une caractéristique de la symbiose industrielle varennoise. De plus, une quantité non précisée de sulfates d'ammonium peut être vendue à des producteurs d'engrais chimiques (Martel, 2018).

1.2 Portrait de Varennes et des alentours

En date du 1^{er} janvier 2018, la population de Varennes était de 21 743 habitants. La superficie du territoire de la municipalité est de 94 km². Celle-ci est bordée, à l'ouest par le fleuve Saint-Laurent, au Sud par la municipalité de Boucherville, au Sud-Est celle de Sainte-Julie, à l'est se trouve Saint-Amable et au Nord, les municipalités de Calixa-Lavallée et Verchères. La ville de Varennes possède trois pôles économiques, chacun regroupé dans son propre parc.

Les plans d'urbanisme de l'annexe 1 situent les composantes du milieu rural et urbain du territoire Varennois. C'est là que sont identifiés les différents parcs industriels et commerciaux de la ville ainsi que ses voisins en périphérie (Ville de Varennes, 2015a, 2015b).

1.2.1 Le parc scientifique et technologique

Employant 1 100 personnes, ce parc, situé dans le secteur du boulevard Lionel-Boulet, est l'hôte de plusieurs centres de recherches et laboratoires. L'Institut national de la recherche scientifique (INRS) possède notamment deux laboratoires de pointe soit le laboratoire international de source de rayonnement laser ultra rapide (ALLS) et le laboratoire de micro et de nanofabrication (LMN). Hydro-Québec est aussi présente avec l'Institut de recherche en électricité du Québec (Ville de Varennes, s. d.).

1.2.2 Le parc métallurgique et technique

Environ 1 750 travailleurs sont employés dans cet autre parc aussi situé le long du boulevard Lionel-Boulet. Tel que le nom du parc l'indique, les entreprises œuvrant dans le secteur sont principalement orientées sur l'usinage ou la vente de métaux usinés. En réalité, ce parc a de multiples déclinaisons et se mérite un nouveau nom. Avec les années, d'autres entreprises ayant différentes vocations s'y sont greffées. Par exemple, en 2015, un nouveau centre de distribution pour la chaîne Jean Coutu a été inauguré (TVA Nouvelles, 2015, 10 octobre). De plus, Costco vient d'y construire son centre de distribution pour tout l'Est canadien (FM 103,3, 2019, 14 janvier).

1.2.3 La zone industrialo-portuaire.

Le nord de la ville accueille ce qui s'appelait avant 2016 le parc chimique et pétrochimique de Varennes, maintenant réorienté en zone industrialo-portuaire. Une ZIP est un parc industriel situé à proximité de services portuaires ainsi que d'infrastructures routières et ferroviaires. Elle facilite l'arrivée d'intrants et la distribution de produits vers les marchés nord-américains et internationaux. Quatre des 16 zones industrialo-portuaires du Québec sont en Montérégie, soit Contrecoeur-Varennes, Côte-Sainte-Catherine, Salaberry-de-Valleyfield et Sorel-Tracy (Économie et Innovation Québec, 2019).

Celle de Contrecœur-Varennnes accueille plusieurs usines de transformation de la matière entourées de terres agricoles (Dubuc, 2016, 2 novembre). Le Tableau 1.1 présente les 14 entreprises ayant une implication potentielle dans un scénario de symbiose industrielle située sur le territoire varennois de la ZIP Contrecœur-Varennnes.

Tableau 1.1 : Entreprises d'intérêt et leur vocation actuelle dans la ZIP varennoise

Nom d'entreprise	Vocation
Éthanol Greenfield Québec inc.	Fabrication d'éthanol à partir de maïs-grain (industriel et carburant)
SÉMECS	Fabrication de biométhane, de digestat revalorisé en fertilisant agricole et de sulfate d'ammonium
Kronos Canada	Fabrication de pigments de dioxyde de titane utilisés dans les peintures, plastiques, papiers, encres, caoutchouc, textiles et cosmétiques. Fabrication de gypse synthétique utilisé dans la fabrication de panneaux de placoplâtre
Kemira Water Solutions Canada inc.	Fabrication de coagulants inorganiques à base de fer et d'aluminium
Air Liquide Varennes	Production de gaz industriel (azote, oxygène, argon, CO ₂)
Air Liquide Canada inc.	Emboutillage d'acétylène
Air Liquide Canada, Centre de distribution	Transport de produit cryogénique en vrac, en cylindre à travers le Canada
S.C. Johnson et fils Ltée	Production de sacs de plastique refermables (polyéthylène)
Solmax	Fabrication de géomembranes et assemblage de panneaux de PVC
Dow Chemical Canada inc.	Fabrication de feuilles isolantes en polystyrène extrudé
Provalcid inc.	Centre de traitement de grains, courtiers grains
Praxair Canada inc.	Fabrication et embouteillage de gaz acétylène et embouteillage de propylène
Taghleef Industries Canada inc.	Fabrication de pellicules de polypropylène utilisées dans la fabrication d'emballages flexibles, d'étiquettes de bouteille et de surfaces décoratives
Laboratoires MSP inc.	Fabrication de produits naturels de santé et produits soins de beauté

1.2.4 Autour de la ZIP

Le même exercice a été effectué sur tout l'axe Varennes-Verchères-Contrecœur. Dans le parc de Contrecœur, 19 entreprises supplémentaires de transformation sont d'intérêt pour la symbiose industrielle (Tableau 1.2). Cependant, aucune entreprise actuellement installée à Verchères n'a été considérée faute de développement industriel suffisant. Les autres ZIP montréalaises sont nettement plus éloignées de l'usine cible de Greenfield Global à Varennes. Elles n'ont pas été considérées dans le contexte actuel de l'essai.

Tableau 1.2 : Entreprises d'intérêt et leur vocation actuelle dans le parc industriel de Contrecoeur

Nom d'entreprise	Vocation
ArcelorMittal Montréal inc.	Fonderie de fer et acier
Air Liquide Canada	Production de gaz industriels
Triumvirate Environmental	Service de gestion et d'élimination des déchets (produits chimiques, vrac, tonneaux, gaz, matières dangereuses)
Distribution J.Y.M. Ltée	Fabrication de structures en acier (clé en main)
Écolomondo	Valorisation d'hydrocarbures par décomposition thermique (pneus, plastiques, bardeaux de toits, couches souillées)
Élévateur Rive-Sud inc.	Entreposage, transbordement et conditionnement de céréales
Forage Passe-partout	Forage multidirectionnel
Granttech inc.	Fabrication de granules naturelles et colorées pour bardeaux d'asphalte
Les entreprises Caneptha	Distribution de matières premières pour l'industrie métallurgique
Les entreprises Mécanique GR inc.	Mécanique industrielle, fabrication, soudure
Les Minéraux Harsco	Services environnementaux de traitement des scories
Logistec – Terminal maritime Contrecoeur	Transbordement portuaire et manutention de marchandises en tout genre.
Mécanique de Haute Précision B & B inc.	Reconditionnement et automatisation de machines-outils
NBV Maintenance industrielle	Reconditionnement, maintenance et entretien industriels
Northex Environnement inc.	Évaluation et traitement environnementaux
Praxair Canada	Distribution de gaz industriels
Usitech CL inc.	Ingénierie et conception mécanique
Véolia ES Industriels Canada inc.	Récupération d'huiles, antigels, barils, filtres à l'huile. Installations pour le traitement et l'élimination des matières dangereuses résiduelles, nettoyage d'usines et d'équipements industriels.
Yara Canada L.P.	Distribution d'engrais chimiques

À la lumière des entreprises répertoriées pour l'axe Varennes-Contrecoeur, les éléments à mettre en valeur sont au Tableau 1.3. Ces éléments sont implicitement utilisés afin d'orienter la réflexion sur les modèles développés aux chapitres 4 et 5.

Tableau 1.3 : Synthèse des types d'entreprises composant l'axe Varennes-Contrecoeur

Varennes	Contrecoeur
<ul style="list-style-type: none"> • Agriculture • Production d'énergie à partir de valorisation de la biomasse • Production et distribution de gaz industriels • Chimie des polymères • Pharmaceutique (dans une plus petite mesure) 	<ul style="list-style-type: none"> • Fabrication et travail de l'acier • Logistique (accès au fleuve) • Services en ingénierie • Conseil environnemental et traitement des résidus en tout genre. • Distribution de gaz industriels

1.3 Liens de l'entreprise Greenfield Global dans le contexte régional

La ZIP Varennes-Contrecoeur est à l'intersection entre les milieux ruraux et industriels. C'est dans ce contexte qu'évolue depuis 2007 l'usine d'éthanol de Greenfield Global. En fait, cela fait près de 20 ans que le Québec expérimente la production d'éthanol par fermentation de l'amidon du grain de maïs. À ce jour, l'usine d'éthanol de Greenfield Global produit uniquement de l'éthanol de première génération, c'est-à-dire de l'éthanol produit à partir d'aliments cultivés sur des terres arables (Lane, 2010).

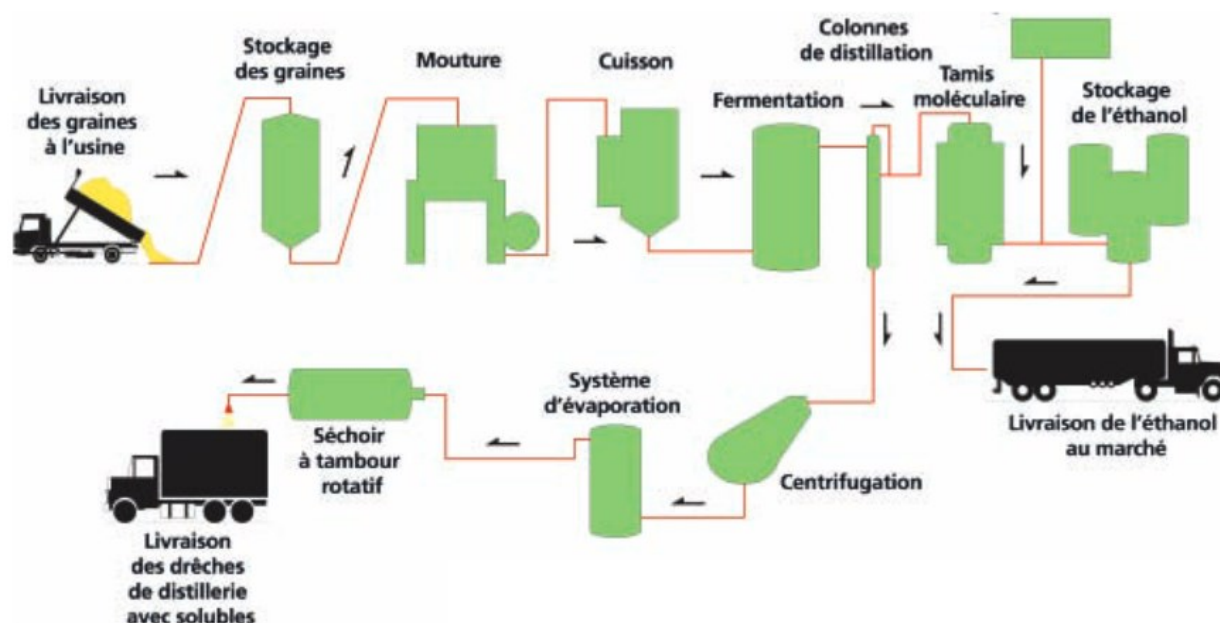


Figure 1.1 : Procédé de production d'éthanol de première génération (tiré d'Agiréseau, 2007)

Au-delà de tous débats quant à la durabilité de ce modèle économique, l'usine est alimentée par des agriculteurs locaux dans un rayon de 70 km. Ils sont regroupés dans une société par actions ou compagnie du nom de Pro-Éthanol inc. Cette société est un des actionnaires minoritaires de Greenfield Global (La Terre de chez nous, 2014, 2 septembre) (Registraire des entreprises Québec, 2019). Les règles de

fonctionnement imposent à ceux-ci d'être membres d'une coopérative agroenvironnementale qui repense les modes culturels afin de restreindre l'utilisation des pesticides et les pertes d'engrais (Olivier, 2016).

Les usines de production d'éthanol de première génération ressemblent toutes de près ou de loin à la Figure 1.1 (Agriréseau, 2007). Les procédés varient surtout sur les méthodes employées pour améliorer l'efficacité énergétique, diminuer la consommation d'eau et concrétiser d'autres types d'efforts en amélioration continue. Dans le cas de la distillerie varennoise, ces efforts portent fruit. L'usine de Varennes ne déverse aucun effluent liquide. Les eaux usées de l'usine sont traitées par biométhanisation. Le biogaz est capté et utilisé comme source d'énergie pour le séchage des drêches en complément avec le gaz naturel. L'eau traitée circule en boucle dans le procédé. L'énergie résiduelle provenant du séchage de la drêche est récupérée et réutilisée comme vapeur pour chauffer le procédé de distillation. La drêche est le résidu du grain à la sortie de la fermentation où les sucres ont été convertis en alcool. C'est donc un résidu concentré en lipides et en protéines. Une partie de la drêche est utilisée pour alimenter le méthaniseur (traitement biologique de l'usine) alors que le reste est retourné aux agriculteurs comme complément alimentaire animalier. C'est une première forme d'économie circulaire (Olivier, 2016).

Une deuxième forme d'économie circulaire tient au procédé de fermentation. En plus de produire de l'alcool, les levures produisent aussi du gaz carbonique. Le CO₂ est capté et acheminé par gazoduc à l'usine voisine d'Air Liquide qui purifie, compresse et vend ce gaz sous forme de glace sèche ou en bonbonne.

Enerkem lance la construction de sa nouvelle usine de biométhanol et d'éthanol cellulosique. Elle veut utiliser des matières résiduelles non recyclables provenant des secteurs institutionnels, commerciaux et industriels (ICI), ainsi que des débris de construction et démolition. La future usine sera construite en deux phases. La première phase permettra la production et la vente de biométhanol dès la mise en service de l'établissement. La deuxième phase permettra de convertir le biométhanol en éthanol cellulosique. Ce dernier pourra par la suite être livré à la distillerie de Greenfield Global afin d'être purifié. Le lancement de la construction est prévu pour la fin 2019. Cette usine s'alimentera à partir des centres de tri de la région (Enerkem, 2019).

Malgré l'aventure conjointe entre Enerkem et Greenfield Global, ce dernier ne cesse pas sa production d'éthanol de première génération. En fait, l'entreprise entend augmenter la production d'éthanol plutôt que de changer l'origine de la matière première (La Terre de chez nous, 2014, 2 septembre). La production prévue d'éthanol, suite à cette nouvelle boucle de symbiose, est anticipée à 300 millions de litres par année.

La Figure 1.2 représente le tout formant un embryon original d'écologie industrielle en opération, donc une symbiose territoriale émergente. La légende est dans le coin supérieur gauche.

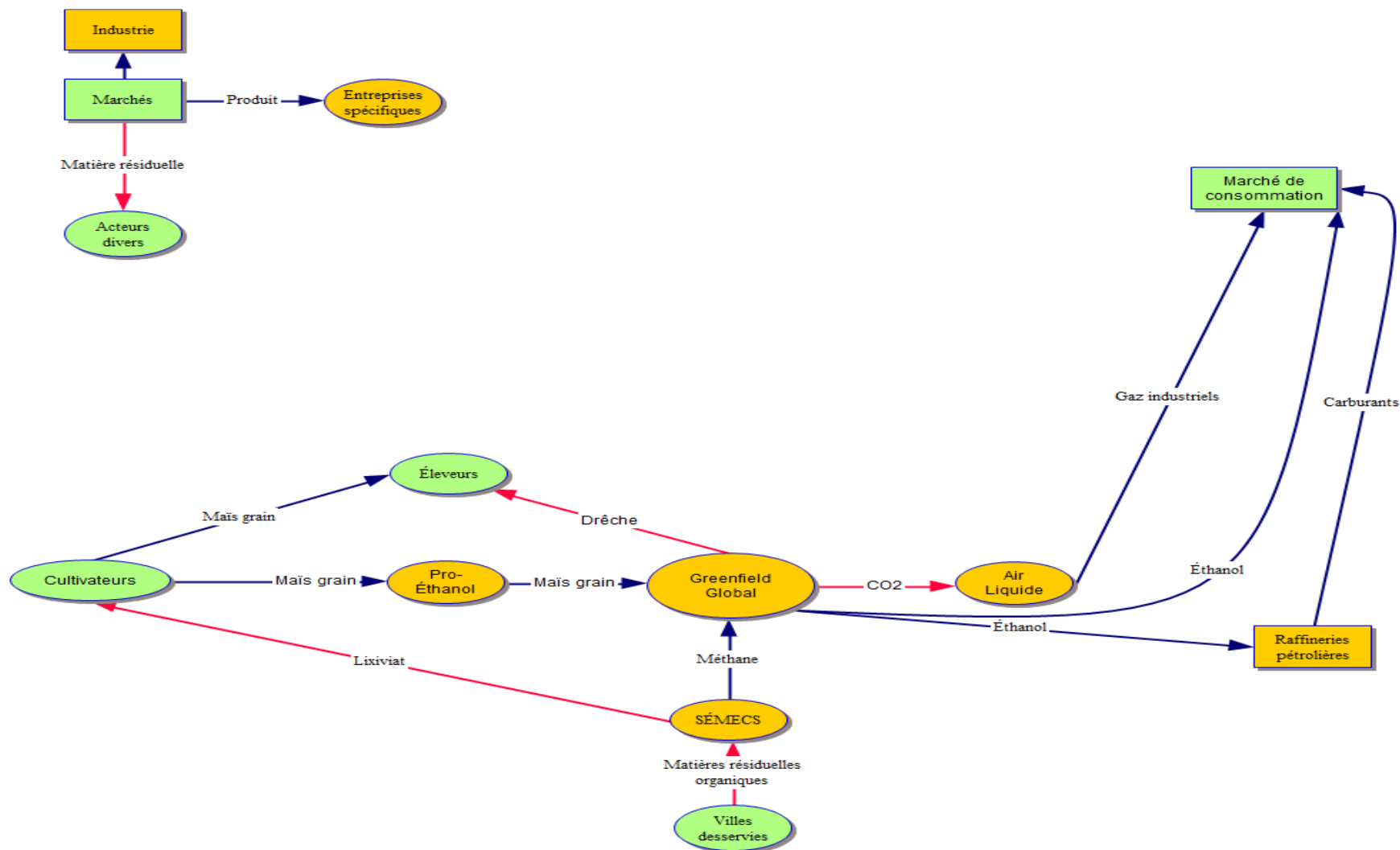


Figure 1.2 : Symbiose industrielle actuelle autour de Greenfield Global aux installations de Varennes

2. SYMBIOSE INDUSTRIELLE

Dans le cadre d'un essai, Linda Esseghaier a publié en janvier 2016 une étude de cas du Parc industriel et portuaire de Bécancour portant sur l'interrelation entre l'écologie industrielle et l'économie circulaire. Dans cette étude, elle fait une revue de la littérature portant sur la symbiose industrielle. De plus, Joany Nuckle s'est livrée à un exercice similaire en novembre 2017 dans un essai portant sur l'analyse du potentiel durable de la symbiose industrielle comme stratégie de déploiement régional de l'économie circulaire au Québec. Les bases de ces deux essais servent d'assise pour celui-ci. Des publications ultérieures à novembre 2017 complètent la revue de littérature.

2.1 Concept

Le centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI) définit la symbiose industrielle comme une forme d'écologie industrielle axée sur un réseau d'organisations maillées entre elles sur un territoire commun par des échanges de matières résiduelles, d'eau, d'énergie ou de ressources matérielles et humaines. Chacun de ces échanges forme une « synergie » (définition adaptée de CTTÉI, 2013). La notion de territoire de proximité, plus spécifiquement, est très importante. Plusieurs essais traitant de la symbiose industrielle ont été réalisés par le passé. Ils expliquent les différentes formes que peut prendre l'écologie industrielle. La coopération entre deux entreprises est la matérialisation de l'écologie industrielle (ÉI). Lorsque celle-ci comprend plusieurs synergies entre diverses entreprises croisées, elle adopte la forme d'une symbiose industrielle. Elle reprend alors l'idée d'une écologie industrielle territoriale (ÉIT), car le sentiment d'appartenance à un territoire devient la clé facilitante qui permet ces regroupements. Pour élargir ces approches, il faut développer plus et mieux. L'approche basée sur les flux actuels constatés et inventoriés permet de repérer les ruptures dans les flux et entre les flux de ce territoire, puis de proposer ce qui manque pour maximiser le rendement territorial. L'économie circulaire (ÉC) devient alors l'outil d'un territoire suffisamment vaste pour bien assoir l'analyse flux par flux et maximiser les retombées économiques d'un territoire, tout en diminuant les impacts environnementaux sur celui-ci. Les actions réalisées maximisent le bouclage des flux en situation de proximité tel qu'illustré à la Figure 2.1. (Fondation Ellen MacArthur, s. d.)

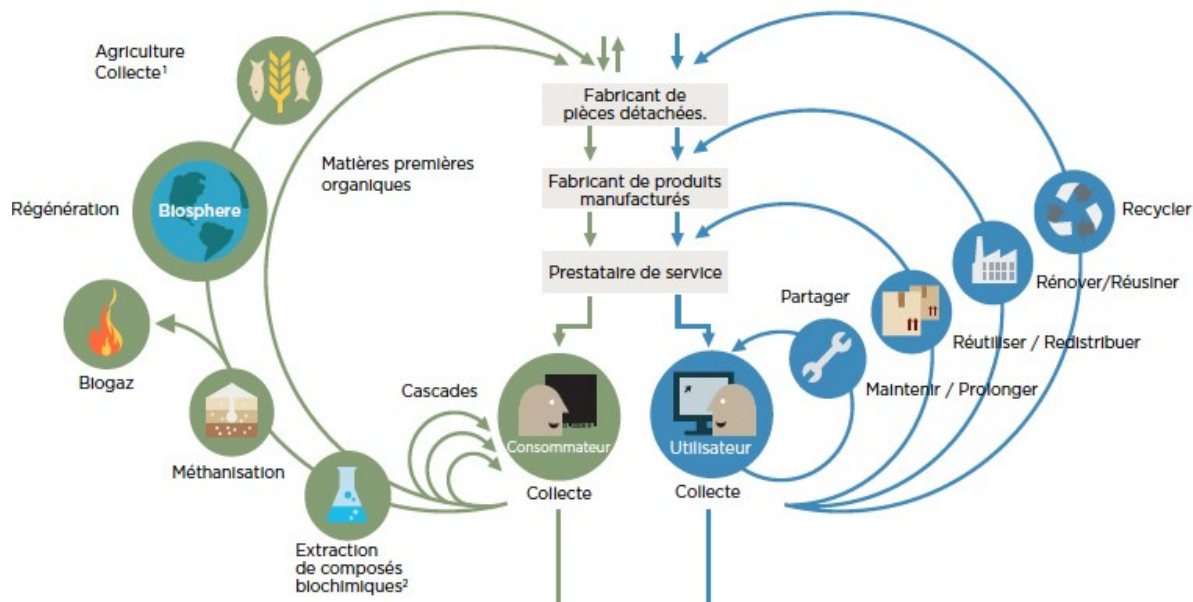


Figure 2.1 : Bouclage des flux de l'économie circulaire (tiré de la fondation Ellen MacArthur)

Les liens entre les concepts d'économie circulaire, d'écologie industrielle et symbiose industrielle sont illustrés au Tableau 2.1.

Tableau 2.1 : Trois niveaux d'application de l'écologie industrielle (adapté de Nuckle, 2017, p. 17 selon une compilation et traduction libre de : Chertow, 2000 p. 116; Lifset et Graedel, 2002, p.11; Esseghaier, 2016, p. 16)

Économie circulaire	Écologie industrielle	Intraentreprise	Écoconception
			Prévention de la pollution
			Économie verte
		Interentreprise	Symbiose industrielle
			Analyse de cycle de vie
			Diverses initiatives industrielles
		Régionale / territoriale	Analyse des flux de matières et d'énergie
			Dématérialisation
			Décarbonisation

2.2 Les échanges

Les échanges mentionnés dans les niveaux d'application de la Figure 2.1 ne sont pas forcément des synergies. En fait, ils peuvent être regroupés selon 5 types. Le Tableau 2.2 décrit chacun d'eux, seuls les types 3 à 5 sont des synergies.

Tableau 2.2 : Types d'échanges de sous-produits dans une symbiose industrielle (compilé de Chertow, 2000; Esseghaier, 2016; tiré de Nuckle, 2017)

Types d'échanges	Explications
Type 1	Les échanges de sous-produits sont réalisés par les industries vers les agents externes de collecte des déchets.
Type 2	Les sous-produits sont échangés au sein même de l'entreprise plutôt qu'au sein d'un réseau externe de partenaires. L'objectif est de tendre, à l'interne, vers le zéro déchet et vers l'efficacité des procédés.
Type 3	Les sous-produits sont échangés entre les entreprises et les organismes tous regroupés sur un territoire délimité qui est généralement un parc éco-industriel.
Type 4	Les sous-produits sont échangés entre les entreprises et les organismes déjà localisés dans un parc industriel avec d'autres acteurs situés à l'extérieur de ces frontières, mais tout en étant assez proches géographiquement pour permettre les échanges.
Type 5	Les sous-produits sont échangés entre les entreprises et les organismes d'un parc éco-industriel ainsi qu'avec d'autres acteurs situés à une distance géographique plus grande. Les échanges sont basés sur la relation et les liens entre les acteurs plutôt que la seule proximité géographique.

2.3 Synergies

Afin de mieux approfondir la notion d'échanges, il est important de définir ce qu'est une synergie. En renvoyant une fois de plus à la définition du CTTÉI, ces synergies peuvent être de substitution ou de mutualisation.

2.3.1 Synergies de substitution

Dans le domaine de la symbiose industrielle, un consensus existe lorsque vient le temps de définir les termes. Ainsi, pour parler des synergies de substitution, le CTTÉI y va de la définition suivante :

« Dans ce type de synergie, un résidu se substitue en tout ou en partie à une matière première ou à un intrant dit vierge. Cette ressource appelée « matière secondaire » permet d'allonger l'utilisation et le cycle de vie des matériaux d'une organisation participante à l'autre. La concrétisation de ce type d'échange peut nécessiter le tri, la mise en forme (pastillage, granulation, ensachage, etc.) ou la décontamination préalable de la matière à utiliser, voire la réalisation de projets de recherche appliquée pour le développement d'un nouveau produit (CTTÉI, 2013).

L'Université virtuelle environnement et développement durable (UVED) y va d'une définition similaire, quoique moins développée. Cependant, elle ajoute que ce type de synergie permet de faire diminuer les coûts en approvisionnement ou les coûts de traitement pour un flux sortant. De plus, sur un plan environnemental, « il peut permettre d'économiser des ressources non renouvelables et d'éviter les émissions de polluants et de déchets liées à la production de matières premières neuves qui ont été

substituées. » (UVED, 2012) Le couple Greenfield-SÉMECS se rapproche de cette définition. Les matières résiduelles des MRC de la région sont valorisées en biogaz et celui-ci est substitué au gaz naturel utilisé par Greenfield Global pour son usine.

2.3.2 Synergies de mutualisation

Le concept des synergies de mutualisation défini par le CTTÉI va comme suit :

« Dans une mutualisation, les participants partagent et tirent le meilleur parti de leurs ressources en coordonnant leur gestion et leurs besoins. Il s'agit de partager des services, des équipements, des espaces, etc. Le pouvoir du groupe permet notamment de réaliser des économies d'échelle dans l'achat de biens ou de services et d'optimiser la logistique sur le territoire. Une meilleure gestion du transport (approvisionnement, disposition, collectes, etc.) permet notamment d'améliorer le bilan carbone du groupe. Les ressources mutualisées peuvent être prises en charge par un tiers ou par un membre participant. Un membre participant peut aussi être l'utilisateur de ces ressources. » (CTTÉI, 2013)

Ce type de synergie favorise avant tout la coopération dans la distribution de flux communs. Un exemple pour un parc industriel serait la centralisation de la production de vapeur. Au lieu d'avoir plusieurs chaudières pour chaque usine ayant besoin de chauffer ses installations, une économie d'échelle peut être réalisée par la production et distribution de vapeur à partir d'une plus grande unité centrale. C'est d'ailleurs ce qui se passe au Danemark dans l'écoparc de Kalundborg (figure 2.2), où la station énergétique d'Asnaes et la station de traitement de l'eau potable sont au centre des différentes synergies du parc (Kalundborg Symbiosis, 2018).

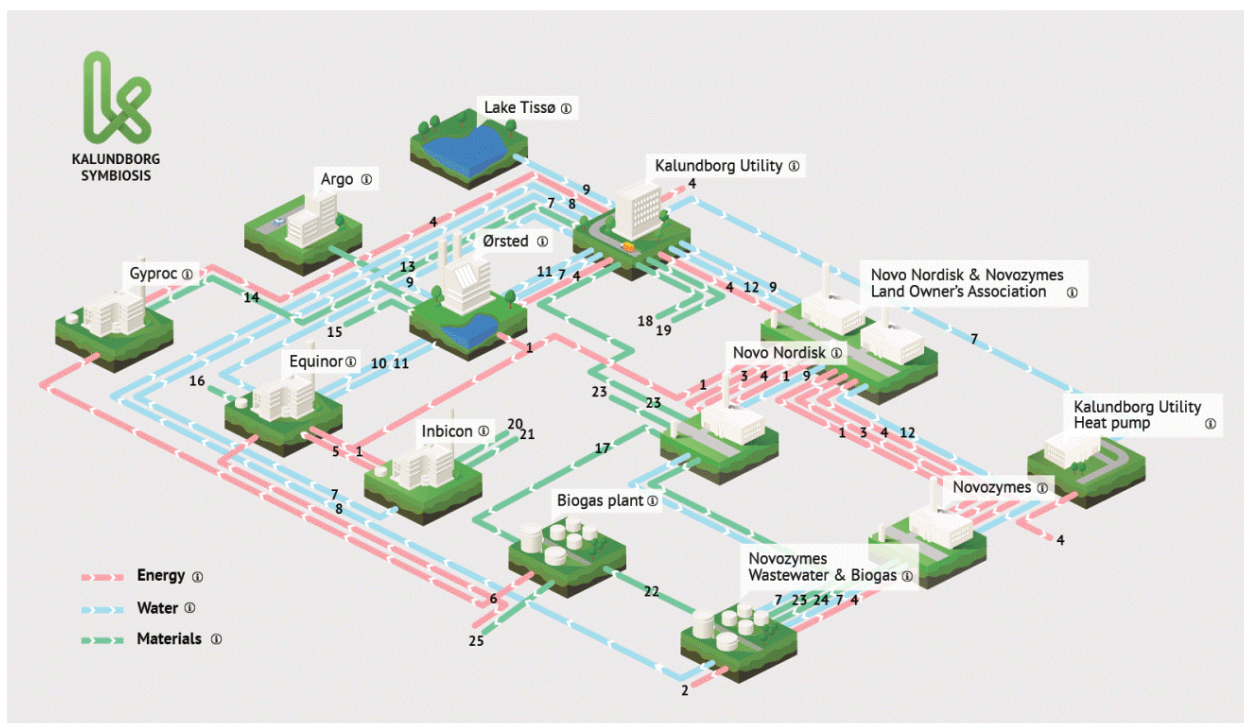


Figure 2.2 : Flux de matières et d'énergie à Kalundborg (Kalundborg Symbiosis, 2018)

2.4 Modes de formation d'une symbiose

La symbiose industrielle se forme de trois façons. Elle peut être autoorganisée, planifiée ou facilitée. Le Tableau 2.3 résume l'émergence de ces formations. Peu importe la façon dont naît la symbiose industrielle, Paquin et Howard-Grenville (2012) concluent qu'il faut une bonne dose de sérendipité pour obtenir un cas à succès. C'est un peu dans cette idée que ce travail s'inscrit.

Tableau 2.3 : Modes de formation d'une symbiose industrielle (traduit de Paquin et Howard-Grenville, 2012; adapté de Nuckle 2017)

Modes de formation	Explications
Autoorganisée	Une symbiose est une structure industrielle qui émerge à partir des réseaux de connaissances des entreprises ou de leurs mises en contact fortuites.
Planifiée	Une symbiose est une structure planifiée dans le cadre d'objectifs particuliers de développement territorial.
Facilitée	Une symbiose est une structure industrielle qui émerge de façon facilitée par des organisations, des centres de transfert, des agences de développement économique ou des individus qui contribuent au déploiement de chaque synergie industrielle individuellement, mais sans prendre part directement aux décisions impliquées et sans nécessairement avoir des objectifs précis de croissance.

2.5 Modèles de projet de symbiose industrielle

Le mode de formation aura une influence sur l'aboutissement de la symbiose industrielle. Celle-ci aboutira dans un ou l'autre des modèles décrits par Chertow et Ehrenfeld (2012). Le Tableau 2.4 liste ces modèles et décrit les caractéristiques propres à leur mise en œuvre.

Tableau 2.4 : Modèles de projet de symbiose industrielle en fonction de leur mise en œuvre (traduction libre de : Chertow et Ehrenfeld, 2012; tiré de Esseghaier, 2016)

Modèles de projet de symbiose industrielle	Caractéristiques
Parc industriel	-Création du parc industriel initiée par des entrepreneurs publics ou privés -Échanges bilatéraux et modèles de réussite économique prouvée, mais aucune considération aux enjeux environnementaux
Parc éco-industriel planifié	-Initié par les gouvernements et des subventions -Effort dirigé pour identifier les acteurs et les flux de matières -Synergies et coordination pour atteindre des objectifs environnementaux
Parc éco-industriel autoorganisé	-Initié par les acteurs privés motivés par des gains économiques d'échanger des ressources entre eux en réponse à une opportunité de marché
Parc éco-industriel rénové	-Reconstruction de la première catégorie de parc industriel en y intégrant la recherche de nouvelles opportunités d'affaires en fonction des flux de synergies disponibles
Parc éco-industriel d'économie circulaire	-Nouveau modèle en émergence suite au cadre réglementaire en Chine : la Loi sur la promotion de l'économie circulaire -Objectif de jumeler croissance économique et protection de l'environnement

2.6 Démarche de création d'une symbiose

Le CTTÉI, avec les années, a développé une démarche adaptée au contexte québécois pour faciliter la mise en place de projets de symbiose industrielle (CTTÉI, 2013). Le présent projet vise à se rapprocher autant que possible d'une implantation de symbiose industrielle en suivant les étapes proposées par le CTTÉI. Cependant, compte tenu de plusieurs facteurs qui seront abordés au chapitre 10, il est impossible d'accomplir toutes ces étapes en seulement quelques mois. Le Tableau 2.5 résume les étapes d'implantation d'un projet de symbiose industrielle.

Tableau 2.5 : Étapes d'implantation d'une symbiose industrielle (tiré de CTTÉI, 2013)

Étapes	Description
1. Élaboration du projet	<ul style="list-style-type: none"> • Délimiter le territoire • Identifier, solliciter et mobiliser les partenaires • Faire le montage financier du projet • Lancer et diffuser le projet
2. Diagnostic territorial	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier les parties prenantes et analyser les enjeux locaux • Comprendre les caractéristiques industrielles du milieu • Identifier les filières existantes de mise en valeur • Sélectionner les organisations à solliciter
3. Recrutement des participants et collecte de données	<ul style="list-style-type: none"> • Contacter les organisations sélectionnées • Collecter des données sur les flux de matières des organisations participantes afin d'en dresser une cartographie (intrants/demandes et extrants/offres) • Compiler les informations recueillies
4. Identification des synergies potentielles	<ul style="list-style-type: none"> • Identifier et analyser les opportunités de synergies à partir des offres et demandes formulées par les organisations à l'étape 3 • Évaluer et prioriser les synergies les plus porteuses en fonction des critères des organisations participantes, de leur faisabilité technique et des gains qu'elles peuvent apporter
5. Mise en place et suivi	<ul style="list-style-type: none"> • Communiquer les synergies potentielles aux organisations concernées • Assister les organisations dans leurs processus de décision • Accompagner les organisations dans la mise en œuvre de recommandations • Tester et évaluer la faisabilité économique, technique, logistique, etc. Au besoin, réaliser des essais préliminaires en laboratoire, en industrie, sur site ou en consultant des experts. • Définir les modalités d'échange. Au besoin, servir d'intermédiaire neutre dans les négociations et les discussions entre les intervenants impliqués dans la synergie. • Faire le suivi de l'avancement des échanges, recueillir des informations sur les retours d'expérience et diffuser les résultats.

2.7 Avantages et limites de la symbiose industrielle

La symbiose industrielle comporte de nombreux avantages sur des plans gouvernementaux, techniques, économiques, environnementaux, culturels et sociaux. Noyle (2017) les a compilés. Ils sont disponibles à l'annexe 2. Quant aux limites de la symbiose industrielle, bien que nombreuses, elles ne sont pas toutes insurmontables. Le reste de la section 2.7 apporte plus de précisions sur les différents aspects à explorer en SI et les difficultés pouvant y être associées.

2.7.1 Aspect technique

La faisabilité technique se découpe en trois volets. Premièrement il y a le volet qualitatif. En effet, rarement les flux de matériaux sortants d'une entreprise conviennent parfaitement, à une autre. Souvent, il faut modifier le flux, voire le transformer pour atteindre la qualité ou la pureté désirée. Deuxièmement, ces transformations s'effectuent à l'aide de différentes technologies. Ces conditionnements sont une contrainte additionnelle pour l'implantation d'un projet industriel. C'est à partir de ces choix technologiques et de la qualité des flux qu'il devient possible de déterminer si la quantité de matière disponible est acceptable ou non. De plus, certains flux peuvent être en quantité insuffisante sur un territoire donné, il faut alors importer ce qui manque. Cela peut même nécessiter la création d'une nouvelle entreprise. Un approvisionnement problématique peut bloquer un projet, pour sûr.

2.7.2 Apport de la gouvernance

Les lois et règlements peuvent être des embûches pour utiliser et transformer des matières résiduelles. Si le flux de matière est considéré comme un déchet ou comme une matière dangereuse, des procédures administratives supplémentaires s'imposent pour en faire le suivi et le transport. Dans un cas où l'intérêt économique est faible, l'effort nécessaire pour obtenir un léger gain peut être jugé comme insatisfaisant et donc freiner le projet.

2.7.3 Limite économique

Dès que les différentes contraintes réglementaires et techniques sont écartées, il faut aborder les limites économiques. Celles-ci sont surtout des contraintes de conjonctures et de circonstances. Pour cibler et développer des synergies, il est nécessaire d'y consacrer du temps et de l'intelligence. Bien souvent, cela implique un coût à une partie prenante. Toutes les entreprises n'ont pas le capital humain pour effectuer ce travail. De plus, la concrétisation d'une synergie dépend du capital financier disponible au temps zéro (Adoue, 2007). Ultimement, le projet suggéré doit être rentable et pérenne. La Figure 2.3 résume le cheminement logique par lequel un coordonnateur de SI doit passer dans la phase exploratoire de développement de synergies.

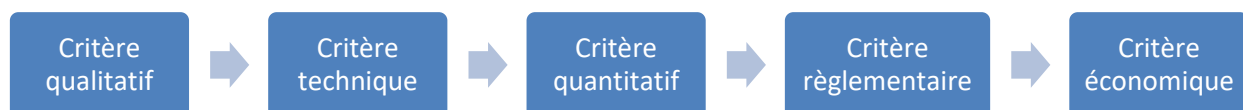


Figure 2.3 : Faisabilité économique d'une synergie (adapté de : Adoue, 2007, p.67)

2.7.4 Angle culturel et social

Les avantages de la symbiose industrielle sont nombreux. Même lorsque les aspects techniques, de gouvernance et économique sont atteignables, encore faut-il que les parties prenantes aient le goût de participer. Ainsi, une mauvaise compréhension des concepts d'écologie industrielle — l'expression en soit étant un oxymore —, la protection de secrets industriels ou encore l'incapacité à collaborer sont trois facteurs humains pouvant stopper la mise en place d'une SI (Adoue, 2007).

2.7.5 Impact environnemental

La mise en place d'une SI ne garantit pas une réduction des impacts environnementaux du cycle de vie. L'idée de départ dans sa mise en place est avant tout de limiter les consommations de ressources naturelles et de réduire les différents rejets liés au fonctionnement de l'économie (Nuckle, 2017). Cependant, lorsque mal exécutée, la SI peut entraîner des déplacements d'impacts environnementaux. En diminuant la consommation de ressources, elle peut entraîner un effet « rebond ». Il faut donc s'assurer que la création d'un projet de SI ne soit pas un « pire mal » que le statu quo ou un scénario de référence similaire (Adoue, 2007).

2.8 L'adoption de la symbiose industrielle au Québec

La symbiose industrielle est en branle au Québec. Presque chaque région administrative possède un organisme qui agit à titre de coordonnateur de la SI (Synergie Québec, 2019). Comme Essaigaher et Nuckle l'ont démontré par le passé, le concept de la SI est en train d'arriver à sa maturité. Le gouvernement du Québec, par le ministère de l'Économie et de l'Innovation, s'est même doté d'un plan d'action « pour la croissance et les technologies propres » (2018-2023) afin de faciliter la croissance des entreprises québécoises. Ce plan est découpé en différents objectifs pourvus de mesures et d'indicateurs. Le tout est regroupé dans trois axes dont le plus pertinent pour cet essai est l'axe 1 : « Des entreprises plus vertes dans toutes les régions du Québec ». Cela vise l'ensemble des entreprises afin qu'elles améliorent simultanément leur compétitivité et leur bilan environnemental. Il se déploie en deux objectifs. Cependant, un seul d'eux touche à la SI, soit celui d'accélérer l'adoption de pratiques d'affaires écoresponsables par les entreprises. Concrètement, les actions proposées pour le premier objectif de l'axe 1 se résument comme suit :

- Élaborer et adapter la feuille de route québécoise en économie circulaire pour 2020.

- Réaliser un projet pilote portant sur l'intégration d'outils de traçabilité et d'optimisation logistique dans les démarches d'écologie industrielle. Ce projet pilote est une collaboration entre le Réseau Environnement, RECYC-QUÉBEC et l'Institut d'innovation en logistique du Québec.
- Octroyer une aide financière à l'Institut de l'environnement, du développement durable et de l'économie circulaire (EDDEC) pour coordonner le développement des outils nationaux nécessaires au déploiement de l'économie circulaire à court terme.
- Réaliser les appels de projets thématiques prioritaires pour le Québec portés par des promoteurs du milieu pour stimuler l'essor de l'économie circulaire dans un secteur d'activité ou sur un territoire.

Ces actions ont pour objectifs spécifiques de développer l'expertise québécoise en matière d'économie circulaire et d'appuyer des projets structurants en économie circulaire au bénéfice des entreprises du Québec. Les autres mesures et actions du plan vont dans un sens similaire de développement d'expertise, de financement et d'implantation de technologies vertes (Gouvernement du Québec, 2018). Bref, le gouvernement du Québec s'est donné le rôle de supporter à l'arrière-plan les différents acteurs et parties prenantes de la société civile et corporative œuvrant dans l'implantation de la symbiose industrielle.

3. L'ÉTHANOL

L'éthanol ou alcool éthylique ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) est une matière organique oxygénée versatile. En effet, il peut être utilisé comme solvant, germicide (antibactérien, antifongique, antivirus), antigel, dépresseur du système nerveux, carburant, intermédiaire en chimie, et dans sa forme la plus connue, comme breuvage. À son état pur et aux conditions atmosphériques normales, c'est un liquide incolore, volatil, inflammable. Son odeur et son goût varient en fonction de sa dilution dans l'eau (Logsdon, 2004). En raison de sa formation d'azéotrope avec l'eau, il est impossible d'obtenir de l'éthanol pur à 100 %. Pour cela, il faut le dénaturer avec un autre solvant organique comme du benzène (Korestky, 2012).

3.1 Propriétés physiques

Le Tableau 3.1 énumère les propriétés physiques intéressantes de l'éthanol.

Tableau 3.1 : Propriétés physiques de l'éthanol (traduit de Logsdon, 2014)

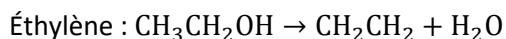
Propriété	Valeur	
Point de congélation	-114,1	°C
Point d'ébullition	78,32	°C
Viscosité	1,17	mPa·s
Masse volumique à 20 °C	0,7893	g/mL
Chaleur de combustion à 25 °C	29,68	kJ/g
Limite inférieure d'inflammabilité dans l'air	4,3	% vol
Limite supérieure d'inflammabilité dans l'air	19	% vol
Température d'auto-ignition	423	°C
Chaleur spécifique à 20 °C	2,42	J/(g·°C)

3.2 Propriétés chimiques

De manière générale, les principales réactions possibles de l'éthanol sont celles du groupe hydroxyle (OH), soit la déshydratation, la déshydrogénation, l'oxydation, l'estérification et l'halogénéation.

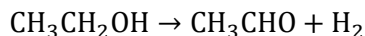
- Déshydratation

L'éthanol peut être déshydraté pour former un alcène, plus spécifiquement de l'éthylène ou de l'éther diéthylique (Clark, 2009a) (Logsdon, 2004).



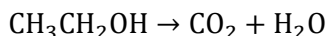
- Déshydrogénation

Il est aussi possible de transformer l'éthanol en acétaldéhyde à partir d'une réaction de déshydrogénation (Logdson, 2004).



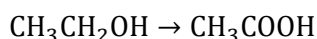
- Combustion (ou oxydation forte)

L'éthanol est brûlé dans une réaction exothermique pour produire du CO_2 et de l'eau. Cependant, l'éthanol produit à partir d'une biomasse actuelle est considéré carboneutre selon la comptabilité de Kyoto. C'est pourquoi au Canada, depuis le 15 décembre 2010, il est obligatoirement ajouté à l'essence à un minimum de 5 % (Esso, 2014). Cela permet de réduire le bilan des émissions canadiennes de gaz à effet de serre en considérant que cette énergie n'est pas d'origine fossile.



- Oxydation douce

L'éthanol lorsqu'il est oxydé donnera son acide carboxylique : de l'acide acétique (Clark, 2009b).



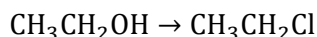
- Estérification

La réaction d'estérification permet de convertir un acide carboxylique en ester en utilisant un alcool comme l'éthanol. Il en sera question plus tard, puisque c'est une façon qui permet de lier deux chaînes carbonées ensemble.



- Halogénéation

Il est possible de créer du chloroéthane par halogénéation, mais ce n'est pas à partir de l'éthanol que la réaction est la plus efficace. Il n'est donc pas intéressant de pousser les réactions possibles plus loin (Kennepohl, Farmer, Reusch, 2018).



3.3 Production

L'éthanol industriel peut être obtenu de deux façons. Il peut soit être fabriqué synthétiquement à partir de l'hydratation de l'éthylène comme sous-produit de procédé. Sinon, il est fabriqué naturellement par la

fermentation de sucre et amidon. Pour la simplicité de ses procédés et des échelles de production atteignables, cette voie est la plus populaire à travers le monde (Nur, Ayub et Zalizawati, 2014).

La source d’approvisionnement organique distingue les procédés de fabrication en deux catégories. Lorsqu’il est question d’utiliser un procédé nécessitant peu de transformation, comme du sucre ou de l’amidon qui résulte d’une production agricole, il est question d’éthanol de première génération. Lorsque la matière première n’est pas de source comestible, comme dans le cas de résidus de cellulose du bois, il est plutôt question d’éthanol de seconde génération (Evans, 2007).

En 2017, la production mondiale d’éthanol dépasse les 120 000 000 m³ (Licht, 2018). La Figure 3.1 met en évidence la forte croissance de la production d’éthanol depuis 2005.

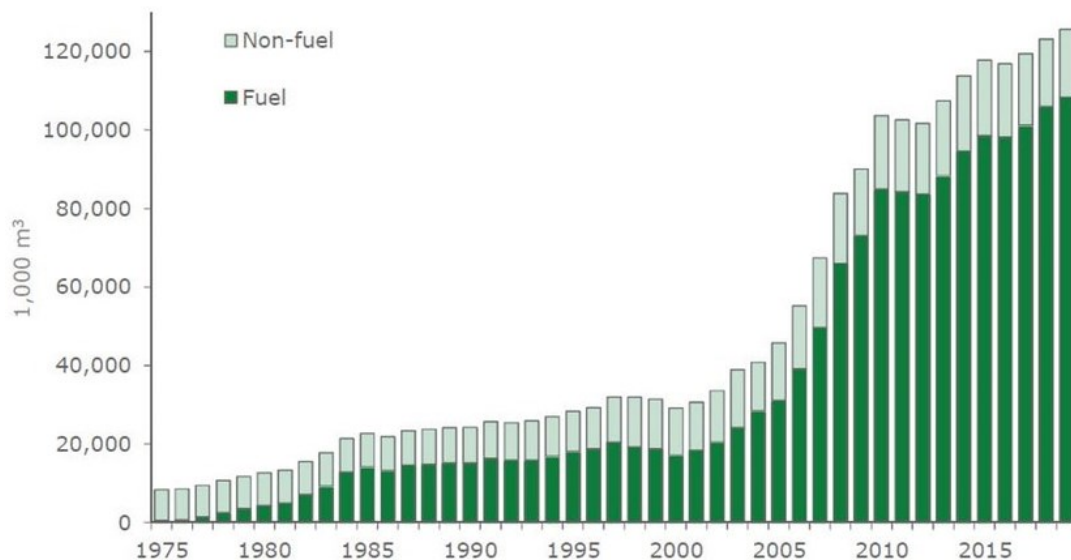


Figure 3.1 : Production mondiale d'éthanol depuis 1975 (tiré de Licht, 2018)

La Figure 3.1 dénote aussi qu’environ 80 % de l’éthanol produit mondialement est destiné au secteur énergétique et aux transports. Les données de l’année 2018 sont reprises à la Figure 3.2 et mettent l’emphase sur les plus grands producteurs d’éthanol carburant dans le monde. Les États-Unis d’Amérique sont en première place avec leur transformation de l’amidon du maïs en sucre qu’ils font par la suite fermenter. Le Brésil est le deuxième avec sa fermentation directe du sucre de canne. (Statista, 2019).

Actuellement, il faut environ 2,60 kg de maïs pour produire un litre d’éthanol conventionnel (Cornell Chronicle, 2001). En prenant une base de calcul de production de 120 millions de mètres cubes d’éthanol, ce sont 2 810 000 TJ qui ont été produits par la fermentation en 2017. Or, en 2016, la production mondiale d’énergie a été de 13 760 mégatonnes équivalentes de pétrole (Mtep). Il s’agit de 576 000 000 TJ.

La production d'éthanol mondiale correspond donc approximativement à 0,49 % du mix énergétique mondial selon l'*International Energy Agency* (IEA) (2018).

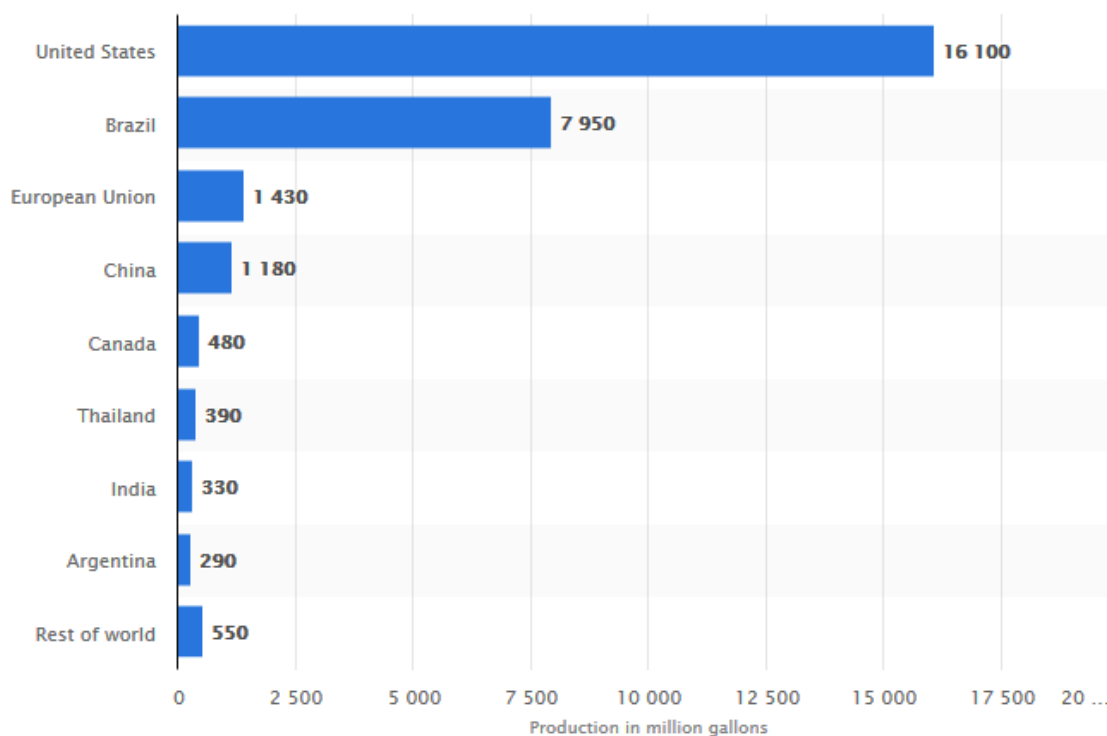


Figure 3.2 : Production mondiale d'éthanol carburant en million de gallons américains en 2018 (tiré de Statista, 2019)

L'expression "mix énergétique mondial" est définie par l'IEA comme la production d'énergie primaire sous toutes ses formes (charbons de tous genres, tourbe, pétrole conventionnel et de schiste, nucléaire, gaz naturel, renouvelable). La production est calculée à la suite du retrait des impuretés comme le soufre dans le gaz naturel. De plus, l'International Maritime Organization (IMO), un institut de l'Organisation des Nations unies (ONU) spécialisé dans les questions maritimes, estime qu'en 2014, l'industrie maritime (pêcheries, commerce domestique et international) a consommé 300 mégatonnes de différents carburants. Exprimé en énergie, cela représente 308 Mtep, ou près de 13 000 000 TJ. Ainsi, la production mondiale d'éthanol de 2017 correspond à près de 22 % de toute l'énergie employée par le transport maritime et les pêches du monde (IMO, 2015) (Concawe, 2017).

Depuis ses débuts, l'industrie américaine de l'éthanol est dépendante des subventions gouvernementales et des taxes de douanes sur l'éthanol brésilien. De plus, similairement au Canada, les pétrolières ont l'obligation d'incorporer 5 % d'éthanol à l'essence automobile. Les subventions de 0,45 \$ le gallon sont

éliminées en 2011 (Rapier, 2019, 11 août). L'obligation des pétrolières d'utiliser de l'éthanol dans leur mélange d'essence est fortement critiquée pour deux raisons. Premièrement, cela crée une forte dépendance des producteurs de maïs au prix du baril de pétrole brut. Deuxièmement, les marges de profit des distilleries sont aussi liées à ce précédent facteur et au prix du maïs-grain qui est artificiellement gonflé par ces obligations. Les producteurs d'éthanol américains sont donc à la merci des cours pétroliers (Runge, 2016) (Rapier, 2019, 15 août).

Compte tenu du contexte de Varennes et des limites thermodynamiques de la transformation de l'éthanol et de la réalité actuelle du marché, deux scénarios ont été identifiés aux chapitres quatre et cinq pour mettre en valeur les synergies complémentaires possibles de la région où est située la distillerie de Greenfield Global.

4. BIODIÉSEL MARIN

Le portrait énergétique du Québec, pour le secteur des transports, est incertain. Il est de plus en plus question de l'électrification du transport routier. Effectivement, le gouvernement du Québec a mis de l'avant plusieurs programmes afin de soutenir l'électrification des transports individuels, collectifs et de marchandises. Ces mesures se retrouvent dans le Plan d'action en électrification des transports 2015-2020 (Gouvernement du Québec, 2015). Elles visent à :

- Augmenter le nombre de véhicules électriques dans le parc automobile du Québec.
- Participer à la lutte aux changements climatiques, notamment en réduisant les émissions de GES.
- Réduire la dépendance énergétique au pétrole et ainsi améliorer la balance commerciale du Québec.
- Contribuer au développement économique du Québec en misant sur une filière d'avenir en utilisant l'énergie électrique disponible au Québec (Transports Québec, 2019).

Cependant, tel que le rapporte Équiterre, l'électrification n'est probablement pas une solution miracle dans la lutte aux changements climatiques et aux émissions de GES. Il s'agirait plutôt d'une dernière mesure à appliquer après la réduction des besoins de déplacement et des distances parcourues (Équiterre, 2018).

De plus, un parc automobile se renouvelle plus rapidement que tout autre moyen de transport motorisé. Notamment, la durée de vie moyenne d'une automobile est plus courte que celle d'autres méthodes de transports. Le Tableau 4.1 compile les âges moyens des différents modes de transports motorisés.

Dans le même ordre d'idée, les taux de décommissions (ferrailage) des voitures sont plus grands que dans d'autres industries, comme celle du commerce maritime où la démolition de vieux navires est d'un ordre de grandeur inférieur à la production de nouveaux navires (United Nations Conference on Trade and Development [UNCTAD], 2018). C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les navires transportant des solides en vrac, comme du minerai de fer, sont aussi jeunes (Tableau 4.1). Les dernières années ont vu une augmentation considérable de cette catégorie de navires dans la flotte mondiale. Ainsi, en considérant la position stratégique le long du fleuve Saint-Laurent qu'occupe le parc industriel de Varennes et en tenant compte de la future réalité énergétique québécoise, serait-il possible de fabriquer un biocarburant pour une flotte de navires équipée de technologies de propulsions conventionnelles, alors que cette dernière se doit de respecter des normes environnementales de plus en plus sévères? Est-ce que cette alternative pourrait être attrayante pour attirer du financement des transporteurs maritimes désireux de sauver des coûts sur le remplacement de leur flottille naviguant sur les eaux du Saint-Laurent?

Tableau 4.1 : Âge moyen des véhicules de transport conventionnels (compilé de Lantz, 2018; Commerce Express, 2018; Thomaselli, 2015; Statista; 2019b et United Nations Conference on Trade and Development, 2018)

Moyen de transport	Espérance de vie moyenne [année]
Voiture	12,88
Camion de fret	15,00
	Âge moyen [année]
Aviation commerciale	11,00
Train	26,50
Navire pétrolier	19,06
Navire-Vrac solide	9,10
Navire-Cargo général	25,82
Navire-Conteneur	11,94
Autres navires	22,86
Tous les navires	20,83

4.1 Besoin répondu

De manière générale trois sortes de carburants sont utilisées par l'industrie maritime, soit les huiles lourdes (*Heavy fuel oil* (HFO)), les huiles à faible teneur en soufre (*Low sulfur fuel oil* (LSFO)) et les huiles de type diesel (*Marine diesel oil* (MDO)) (Livebunkers, s. d.). Le HFO est un terme générique employé pour décrire plusieurs types de carburants utilisés pour générer un déplacement ou de la chaleur. Ils ont la particularité d'avoir une viscosité élevée et une haute masse volumique. C'est un produit résiduel de la distillation du pétrole brut. Cette coupe de colonne est composée d'un mélange de longues chaînes carbonées, généralement entre C_{12} et C_{70} , mélangées à d'autres coupes lourdes afin d'obtenir les viscosités répondant aux spécifications des différents moteurs. Les réglementations prévoient une teneur maximale en soufre de 3,5 %. C'est pourquoi on réfère aussi à cette catégorie d'huile comme *High sulfur fuel oil* (HSFO). Virtuellement tous les moteurs diesels de basses et moyennes vitesses de l'industrie maritime sont conçus pour opérer avec une forme ou une autre de ce carburant. Son utilisation est facilement reconnue par le panache de fumée noire (Figure 4.1) sortant des cheminées des navires (Oiltanking, 2015).



Figure 4.1 : Panache de fumée noire sortant d'un navire en très mauvaise condition de brulage du carburant (Bluebird-electric, 2015)

Les LSFO sont comparables aux HFO à l'exception de la teneur en soufre limitée à 1 % (Oiltanking, 2015). Finalement, les MDO font référence à un mélange de distillats pétroliers et de coupes de HFO. Dans un sens plus strict, il s'agit d'un mélange contenant très peu ou pas de HFO (Oiltanking, s. d.).

À compter du 1^{er} janvier 2020, l'International Maritime Organization (IMO), un institut de l'Organisation des Nations unies (ONU) spécialisé dans les questions maritimes, oblige mondialement les propriétaires de navires enregistrés à l'IMO d'utiliser des carburants à une teneur maximale de 0,50 % de soufre à l'intérieur des zones désignées sous l'annexe VI de la convention internationale pour la prévention de la pollution maritime par les navires (MARPOL) (IMO, 2019). De plus, l'IMO, estime que le commerce maritime international serait responsable de 2,2 % des émissions anthropiques de CO₂ en 2012, où 85 % de ces émissions sont attribuables à des navires de plus de 5000 tonneaux de jauge brute (IMO, 2017; UNCTAD, 2018). L'organisme souhaite donc diminuer les émissions fossiles de cette industrie en ciblant une réduction d'émissions de GES de 50 % en 2050 par rapport aux émissions de 2008. D'ailleurs, il s'est doté de résolutions légalement contraignantes forçant la construction de nouveaux navires plus efficaces énergétiquement. Il est prévu que les navires construits en 2025 soient 30 % plus efficaces que ceux construits en 2014 (IMO, 2017).

Bien conscient de sa part de responsabilité dans les émissions atmosphériques mondiales, le monde du commerce maritime amorce sa transition énergétique. Le choix le plus évident pour le moment semble être le gaz naturel liquéfié (GNL). Cette technologie est la plus mature pour répondre aux demandes post-2020 de l'IMO. Cependant, le GNL étant une énergie fossile, il est probable qu'il ne puisse pas correspondre aux demandes des standards de 2050. C'est pourquoi il est considéré comme une énergie de transition (Parker, 2019). Pour opérer ce besoin de changement, les propriétaires de navires ont deux options. Ils

peuvent soit renouveler leur flotte en commandant la fabrication de vaisseaux plus récents correspondant aux normes actuelles et futures. Sinon, ils peuvent réaménager (rétrofit) leurs navires avec des technologies (de propulsion, de traitement de la pollution) plus récentes afin de respecter ces normes. Les choix étant dispendieux et propres à chaque bâtiment, l'analyse de remplacement se fait donc au cas par cas. Cependant, une tendance dans la construction de nouveaux navires émerge. Depuis au moins 20 ans, le calibre et la capacité de portance des nouvelles embarcations explosent.

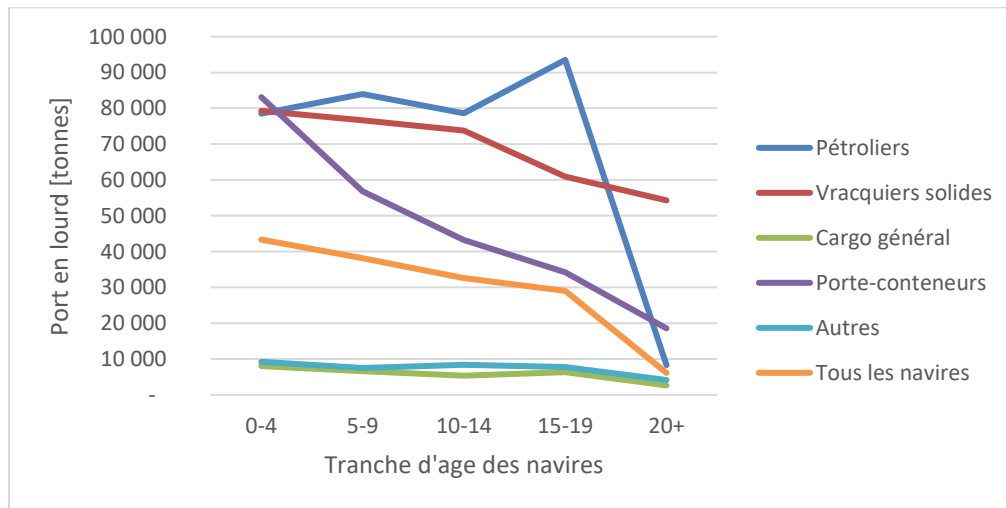


Figure 4.2 : Augmentation de la taille des navires construits selon l'âge (compilé de UNCTAD, 2018)

4.2 Opportunité de marché

La Figure 4.2 montre que les navires construits sont de plus en plus gros. Bien que cette figure ne soit que le constat des moyennes des bâtiments construits, elle prend autant en compte les embarcations plus lourdes de types « post-Panamax » (120 000 tonnes de port en lourd), « Chinamax » (400 000 tonnes de port en lourd) que les plus petites. Inversement, la Figure 4.2 suggère que, de manière générale, les plus petits navires opèrent des technologies plus vieilles (UNCTAD, 2018; Maritime Connector, s. d.).

Dans le même ordre d'idée, la relation entre la taille du navire (tirant d'eau) et son port en lourd n'est pas linéaire (Stott, 2012). La Figure 4.3 montre qu'il y a une économie d'échelle à réaliser sur la taille — dans le cas présent — des vraquiers. Cela dit, il en va de même pour tous types de navires.

D'ailleurs, Pêche et Océans Canada (2019), dans son guide sur les instructions nautiques pour le fleuve Saint-Laurent, de Cap-Rouge à Montréal, indique que la limite de tirant d'eau acceptée pour emprunter les écluses de la Voie maritime du Saint-Laurent est de 7,92 m par rapport au zéro des cartes.

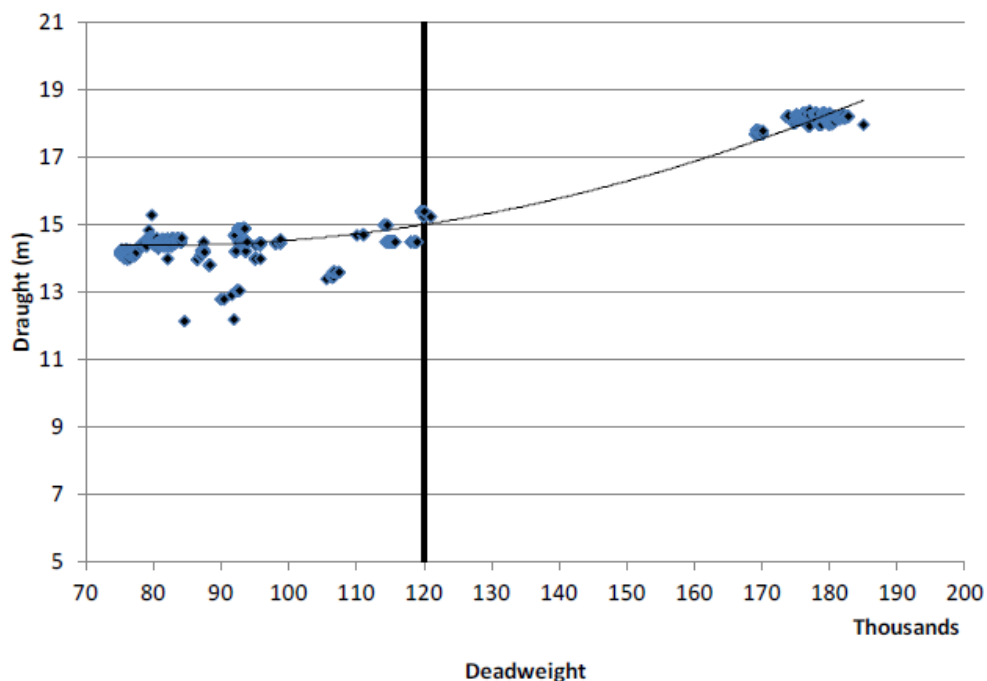


Figure 4.3 : Tirant d'eau (m) en fonction du port en lourd (milliers de tonnes) de vraquiers solides (tiré de Stott, 2012)

Or, le nerf de la guerre pour un transporteur maritime se joue sur les frais d'exploitation où la plus grande dépense est l'achat de carburant. Ces dépenses peuvent être diminuées par des solutions technologiques comme une construction plus hydrodynamique, de meilleures peintures antisalissures qui limitent l'incrustation des organismes marins et des moteurs plus efficaces. Conséquemment, les transporteurs maritimes, n'étant pas en mesure de tirer profit des économies d'échelle qu'offrent les plus grosses embarcations, n'auront d'autre choix que d'être les premiers à adopter ces nouvelles technologies. La Figure 4.4 situe le potentiel de réduction des gaz à effet de serre de ces technologies dans un contexte de navigation (Bouman, Lindstad, Rialland et Strømman, 2017). À noter que le meilleur potentiel de réduction est obtenu par la substitution vers un biocarburant, donc le biodiésel. Il est donc opportun d'œuvrer vers la production de méthodes de propulsions alternatives pour les marines marchandes de ce monde.

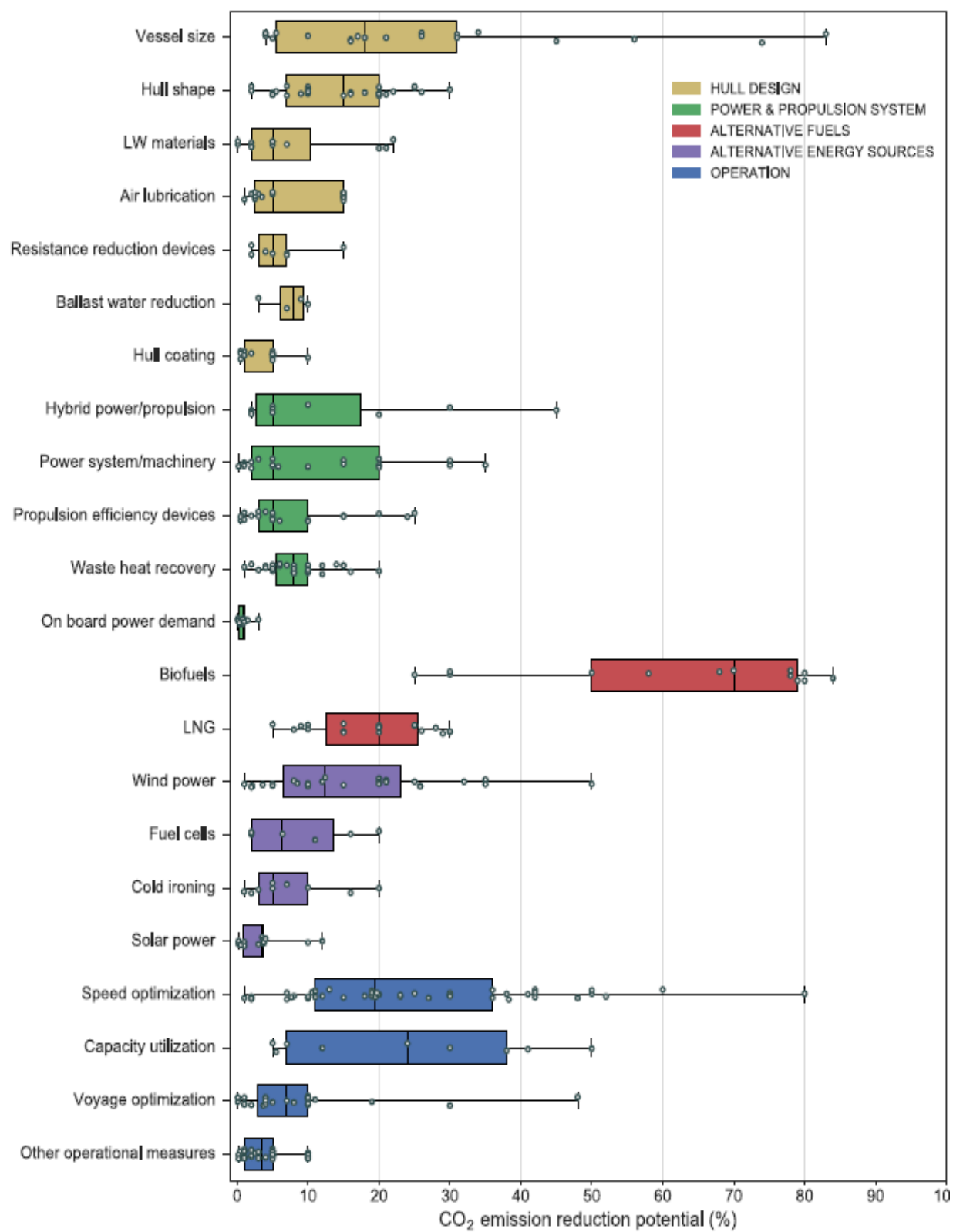


Figure 4.4 : Potentiel de réduction de GES de différentes technologies (tiré de Bouman et al, 2017)

4.3 Description du scénario

En fait, le mot « biodiésel » est un abus de langage. Sans être homologué, le biodiésel est un mélange normé où les producteurs doivent atteindre les paramètres physiques et chimiques similaires au diésel d'origine pétrolière. Pour des fins de simplification de lecture, le terme biodiésel sera utilisé dans l'essai, bien qu'en réalité il réfère ici spécifiquement aux esters méthyliques d'acides gras (EMAG) et esters éthyliques d'acides gras (EÉAG).

Le principe de fabrication du biodiésel est assez simple. Il s'agit de faire réagir à une certaine température des corps gras issus d'une biomasse actuelle, les triglycérides des huiles végétales ou les esters d'acides gras des animaux, avec un alcool comme le méthanol ou l'éthanol en présence d'un catalyseur acide ou basique. Encore une fois, pour des fins de simplification, les huiles végétales et les gras animaux sont utilisés de façon interchangeable. Les mécanismes de réactions impliqués pour faire du biodiésel sont sensiblement les mêmes. Dans les deux cas, la réaction chimique en est une de transestérification catalytique. Elle consiste à échanger le groupe organique (R') d'un ester avec celui d'un alcool (R'') (Patel, et Shah, 2015).

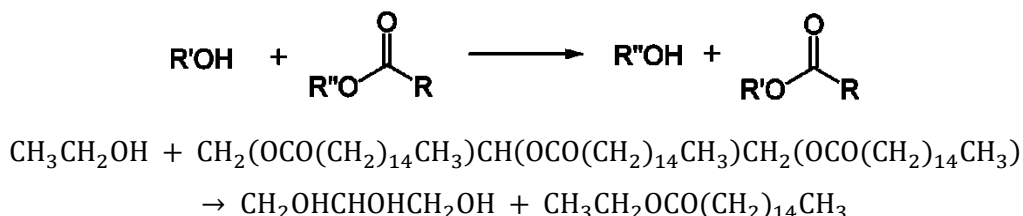


Figure 4.5 : Réaction de transestérification

Cette réaction de transestérification peut être conduite avec de l'éthanol (Figure 4.5). Elle scinde le triglycéride en trois chaînes moléculaires de biodiésel. Le sous-produit de la réaction est le glycérol. Il est utilisé dans une multitude d'industries des secteurs pharmaceutiques, cosmétiques, hygiéniques et alimentaires (Morrison, 2000). La stœchiométrie de la réaction requiert 1 mole de triglycérides qui réagit avec 3 moles d'alcool pour donner 3 moles d'ester et 1 mole de glycérol.

4.4 Train technologique proposé

Partant du principe simple de sa fabrication, des multitudes de recettes de biodiésel existent. Internet n'est pas avare de suggestions. Il existe même des didacticiels permettant d'apprendre les notions de base pour faire son propre carburant, chez soi, avec du matériel peu sophistiqué (make-biodiesel.org, 2019). Les utilisateurs de ce genre de site Internet sont encouragés à expérimenter et à optimiser leur recette selon les matériaux qu'ils se procurent. D'ailleurs, c'est en quelque sorte ce que l'industrie privée du

biodiésel fait, à plus grande échelle. Les gras animaux et végétaux sont mélangés dans différentes proportions, les températures souhaitées varient d'une usine à une autre, au point où l'instrumentation et la spécificité du procédé sont uniques à chaque usine (Guillemette, 2019). Cette unicité des recettes relevant du secret industriel fait en sorte que la seule option « légitime » comme source d'information est la littérature scientifique expérimentale à petite échelle. Pour cette source, bien que le chemin d'optimisation soit documenté et justifié, les proportions suggérées doivent quand même être prises sous réserve. Dans le cadre de cet essai, elles ne servent qu'à estimer les ordres de grandeur d'une hypothétique production.

Ainsi donc, Greenfield Global produit 170 millions de litres par année d'éthanol avec la possibilité d'augmenter cette production à 300 millions de litres. Les questions suivantes se posent :

Hypothétiquement, quelle quantité d'esters d'éthyle serait-il possible de produire en utilisant 100 % de la production d'éthanol de l'usine varennoise de Greenfield Global? Quelles quantités d'intrants seraient nécessaires au procédé? Finalement, quelle quantité de glycérol sera produite?

En se basant sur la stœchiométrie de la réaction de transestérification et sur des recettes présentées ((Anastopoulos, 2009) (Mendow, 2012), il est possible de proposer un procédé industriel ressemblant à la Figure 4.6 .

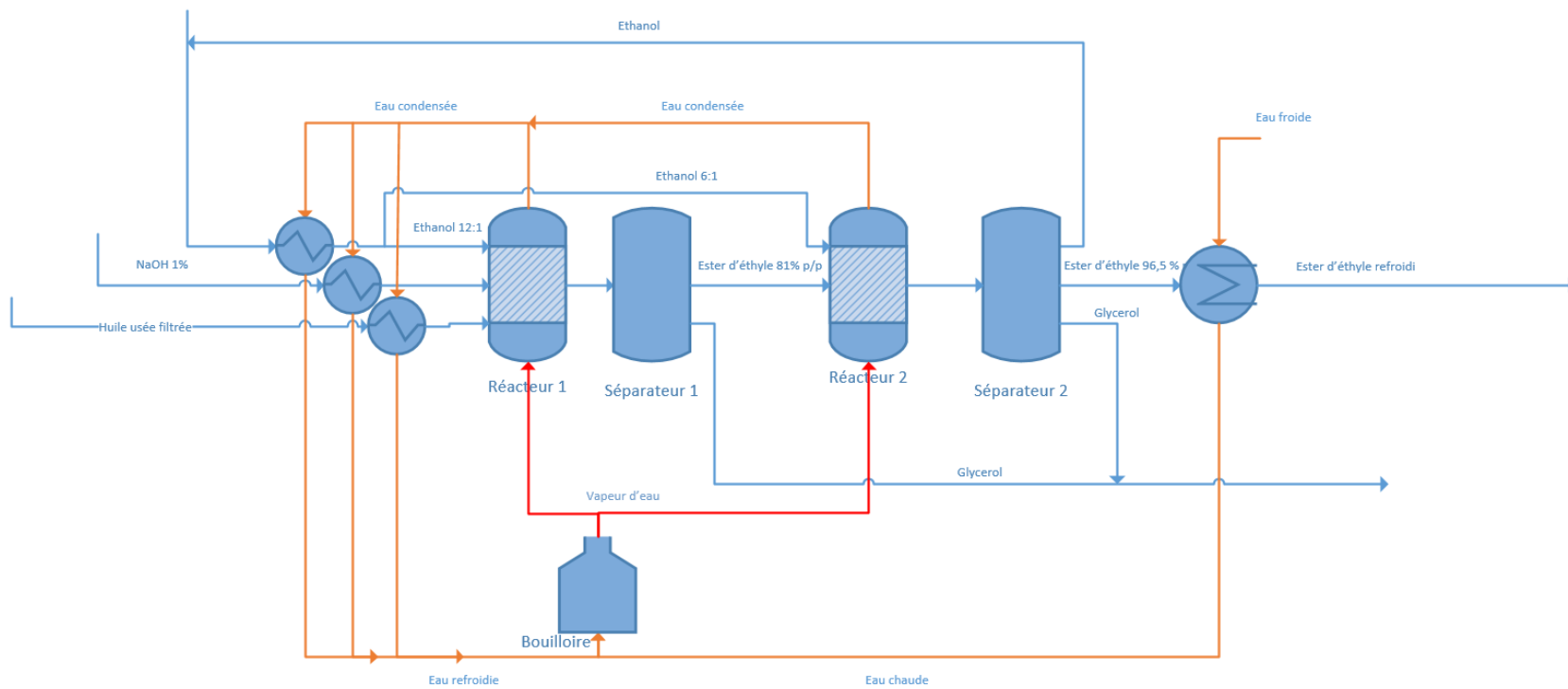


Figure 4.6 : Procédé d'une transestérification à deux étapes (Proposition basée sur Anastopoulos, 2009 et Mendow, 2012)

4.5 Produits

L'usine de transestérification à deux étapes de la figure 4.6 aurait les flux estimés présentés au Tableau 4.2.

Tableau 4.2 : Flux annuel des réactifs et des produits principaux

	Produits et réactifs	Masse [Tonnes]	Balance [Tonnes]	%
Réactifs	Éthanol	237 000	1 133 000	20,9
	Huile	886 000		78,2
	NaOH	10 100		0,89
Produits	Ester d'éthyle	930 000	1 208 000	77,0
	Glycérine	277 000		23,0
Écart			-75 000	6,21

Concrètement, que représentent ces chiffres? À titre comparatif, en 2018, le Canada a exporté à travers le monde 3 233 000 tonnes d'huile de canola (Canola Council of Canada, 2019). Ainsi, une raffinerie transformant uniquement de l'huile alimentaire usée et consommant toute la production d'éthanol de Greenfield Global, à Varennes, serait capable de recycler 27,3 % des exports canadiens d'huile de canola s'ils étaient récupérés.

D'autres parts, l'ester d'éthyle a une chaleur de combustion observée à environ 38 MJ/kg (Anastopoulos et Al. 2009). Annuellement, à elle seule, la bioraffinerie de Varennes permettrait donc de produire un équivalent énergétique d'environ 35 000 TJ/ an de biodiésel. Il a déjà été mentionné à la section 3.3 que le commerce maritime mondial consommait en 2016, près de 13 000 000 TJ de carburant. La quantité de biodiésel produite représente donc environ 0,27 % de la consommation mondiale du transport maritime international.

Les calculs étant effectués à partir de deux ouvrages différents, une certaine incertitude s'installe et explique la différence de 6,21 % dans la balance du bilan massique. Toutefois, malgré cette possible variation, les ordres de grandeur restent les mêmes. Cela rend donc possible l'exploration de l'exportabilité et de l'universalisation du procédé. En extrapolant les calculs précédents à la production annuelle mondiale d'éthanol (120 millions de m³), les résultats du Tableau 4.3 sont obtenus.

Tableau 4.3 : Réactifs et produits de transestérification potentiellement obtenus à l'échelle mondiale d'éthanol

	Matière	Mégatonnes
Réactifs	Éthanol	95
	Huile	354
	NaOH	4
Produits	Ester d'éthyle	372
	Glycérine	111

L'ester d'éthyle obtenu équivaut à un peu plus de 14 100 000 TJ, soit 110 % des besoins en énergie du commerce maritime. De plus, selon l'étude de Cornell (Cornell Chronicle, 2001), en faisant les conversions nécessaires, les 95 Mt d'éthanol nécessitent la transformation de 312 mégatonnes de maïs. La production mondiale de maïs, en 2017, était de 1 039 Mt (Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2018). En d'autres mots, 30 % des terres arables servant à la culture du maïs sont nécessaires pour alimenter ce modèle.

La glycérine, ou glycérol – ces termes sont utilisés de manière interchangeable dans la littérature – représente près de 23 % des produits transformés sortant d'une usine de biodiésel. Elle peut être purifiée et vendue telle quelle. Elle peut aussi être transformée afin d'être revalorisée. Par exemple, le glycérol est l'ingrédient de base pour la fabrication de plusieurs explosifs composés de nitroglycérine. Il peut aussi être transformé en acroléine par déshydratation et par la suite réformé en éthane par décarbonylation ou en propane par déshydratation suivie d'une hydrogénation (Ciriminna, Pina, Rossi, Pagliaro, 2014) (Brandin, Hulteberg et Nilsson, 2008). Le marché du glycérol a grandement évolué au cours des vingt dernières années. Autrefois, ce marché était presque exclusivement alimenté par des usines de l'industrie oléochimique. Or, depuis le boum du biodiésel, ce secteur produit la majorité du glycérol mondial.

Cette augmentation de l'offre a causé une chute marquée des prix. Pendant l'année 2000, le glycérol pur à 99,5 % pouvait se négocier à 4000 €/t, alors qu'en 2010 il se négocie à 450 €/t. Quant au glycérol brut, c'est-à-dire non purifié, son prix est temporairement déprécié. Il est considéré un déchet industriel, lorsque contaminé par du méthanol à environ 20 % p/p. Ce changement majeur dans le marché du glycérol force la fermeture de la presque totalité des usines dédiées à la fabrication « classique » de ce produit chimique (Ciriminna et al., 2014). Néanmoins, des alternatives existent afin de donner une valeur ajoutée au glycérol brut. Le problème de contamination provient de la toxicité du méthanol pour l'être humain. Un glycérol contaminé à l'éthanol aurait probablement une meilleure valeur sur le marché puisqu'il ne

comporterait pas de danger physiologique (Valtech A, Valtech B, Acros organics, s. d.). Toutefois, les unités de purification du glycérol sont dispendieuses et ne sont pas toujours rentables, surtout lorsqu'il s'agit de plus petites usines (Ciriminna et al., 2014). Cependant, une technologie plus récente permet de contourner ce problème.

4.6 Transestérification par catalyse hétérogène

Plutôt que d'utiliser un catalyseur basique comme l'hydroxyde de sodium ou de potassium mélangé à l'alcool, il est possible d'utiliser un catalyseur solide, placé dans les réacteurs comme garnissage, favorisant ainsi la surface de contact avec les liquides contenus dans celui-ci. Une revue de littérature couvre exhaustivement les différents catalyseurs existants et compare les avantages et inconvénients des différentes méthodes de production de biodiésel. Le Tableau 4.4 résume les éléments pertinents de la revue de la littérature et fait la comparaison entre les avantages et désavantages des différentes méthodes (Nasreen, Nafees, Qureshi, Asad, Sadiq et Ali, 2018).

Tableau 4.4 : Synthèse des avantages et inconvénients entre catalyseurs homogènes et hétérogènes
(adapté et traduit de Nasreen et al., 2018)

Type	Catalyseur homogène	Catalyseur hétérogène
Avantages	<ul style="list-style-type: none"> • Conditions d'opérations modestes : température et pression plus faibles, donc transformation moins énergivore • Catalyseur basique donne une cinétique favorable : grande activité et bon rendement en peu de temps 	<ul style="list-style-type: none"> • Faible impact environnemental, non corrosif, recyclable, gestion simple des matières résiduelles • Meilleure séparation des produits, meilleure sélectivité, meilleure durée de vie des catalyseurs • Produits de meilleure qualité • Frais d'exploitation comparativement plus faibles
Inconvénients	<ul style="list-style-type: none"> • Séparation difficile des produits : problèmes de saponification, formation d'émulsion, réutilisation du catalyseur impossible • Limité aux procédés de type batch • Catalyseurs basiques sensibles aux acides gras libres et à l'eau • Coûts de production comparativement plus élevés 	<ul style="list-style-type: none"> • Catalyseurs dispendieux • Taux de conversions encore perfectible comparé aux meilleurs catalyseurs basiques • Limite de transfert dans les bilans massiques : la présence de trois phases requiert un bon brassage • Nécessite un grand ratio éthanol : huile ainsi que de grandes températures et pressions d'opérations

4.7 Approvisionnement

En résumé, les matériaux nécessaires à la production d'EEAG sont l'éthanol, l'hydroxyde de sodium et la matière oléagineuse qui peut être un mélange d'huile ou de la graisse. La provenance de ces réactifs peut être multiple.

L'éthanol est étudié dans le cas présent parce qu'il est renouvelable, contrairement au méthanol qui est d'origine fossile. En effet, ce dernier est produit à partir du méthane ou du gaz de synthèse (mélange d'hydrogène et de monoxyde carbone). Dans le scénario étudié, l'éthanol provient de la distillerie de Greenfield Global. Pour ce qui est du catalyseur, la provenance est aussi diversifiée qu'il y a de procédés existant pour la transestérification des triglycérides.

Cependant, dans le cas des catalyseurs homogènes, vu le contexte québécois, un choix logique s'impose, c'est-à-dire qu'il serait difficile de justifier l'utilisation d'un autre catalyseur que l'hydroxyde de sodium. En effet, la présence importante de l'industrie des pâtes et papiers et leur besoin historique en chlore pour le blanchiment de la pâte permettent l'existence de plusieurs usines de chlore-alcali comme celles de Eka Chemicals à Magog ou de Olin à Bécancour (Société du parc industriel et portuaire de Bécancour, 2019). Ce procédé consiste à faire l'électrolyse d'une saumure saturée de sel (NaCl). Il produit de l'hydroxyde de sodium (NaOH), du chlore gazeux (Cl_2) et de l'hydrogène gazeux (H_2) (University of Guelph, s. d.).

Quant aux huiles et graisses (H&G), leurs origines peuvent être multiples. L'idée derrière l'application de la symbiose industrielle est avant tout de substituer ou de mutualiser les flux. Donc, idéalement, l'entière des H&G seraient des résidus, à la limite, des déchets issus de l'industrie agroalimentaire. Même s'ils sont usés, ces produits peuvent être de bonne qualité. D'ailleurs certaines petites entreprises peu scrupuleuses vont jusqu'à voler les huiles usées de friture de restaurants tellement ce produit est convoité. Le plus gros joueur de l'industrie de la récupération et du recyclage des H&G alimentaires est certainement l'entreprise Sanimax. Cependant, c'est vers Rothsay qu'il faut se tourner pour la production de biodiésel dans le Grand Montréal. La création d'une nouvelle usine de biodiésel à Varennes viendrait donc leur faire compétition en s'approvisionnant des mêmes H&G (Guillemette, 2019).

Une nouvelle question se pose. Où, ailleurs, se trouvent les H&G alimentaires usées? Si elles ne sont pas récupérées, traitées, ou envoyées à l'enfouissement par les industries, c'est le secteur résidentiel qui les envoie à l'égout. De la recherche est consacrée à la transformation d'usines d'épuration des eaux en bioraffineries. Todd French de l'université du Mississippi, un nom qui revient souvent sur ce sujet, se spécialise sur l'extraction de lipides de la biomasse et des boues municipales. Une des propositions du professeur French est de faire une extraction liquide-liquide avec de l'hexane sur les boues municipales

primaires et secondaires (Dufreche, Hernandez, French, Sparks, Zappi et Alley, 2007) (Mondala, Liang, Toghiani, Hernandez et French, 2008). Les boues primaires et secondaires sont d'abord mélangées avec de l'hexane. Puis, la phase aqueuse, vidée de son contenu lipidique continue le chemin normal de son traitement avec une demande biologique en oxygène (DBO) diminuée. Par la suite, le solvant de la phase organique est acheminé vers une centrifugeuse comme un hydrocyclone, séparant les liquides des solides. Viennent ensuite les étapes d'évaporation de l'hexane. Cette séparation ne demande pas beaucoup d'énergie puisque son point d'ébullition se situe à 68,73 °C (Kirk-Othmer, 1999). L'hexane passant par des évaporateurs sous vide peut ainsi être récupéré à plus de 99 % (Pokoo-Aikins, Heath, Mentzer, Mannan, Rogers, El-Halwagi, 2010). Le procédé proposé peut ressembler à la Figure 4.7, sans que les paramètres d'opérations soient les mêmes. Les meilleurs rendements obtenus dans les expériences de l'équipe du professeur French sont de 14,5 % (masse EMAG/masse boue sèche) pour les boues primaires et de 2,5 % (masse EMAG/masse boue sèche) pour les boues secondaires. Les réactions de transestérification sont réalisées à 75 °C, 5 % v/v H₂SO₄ et un ratio 12 :1 de méthanol (Mondala et al., 2008).

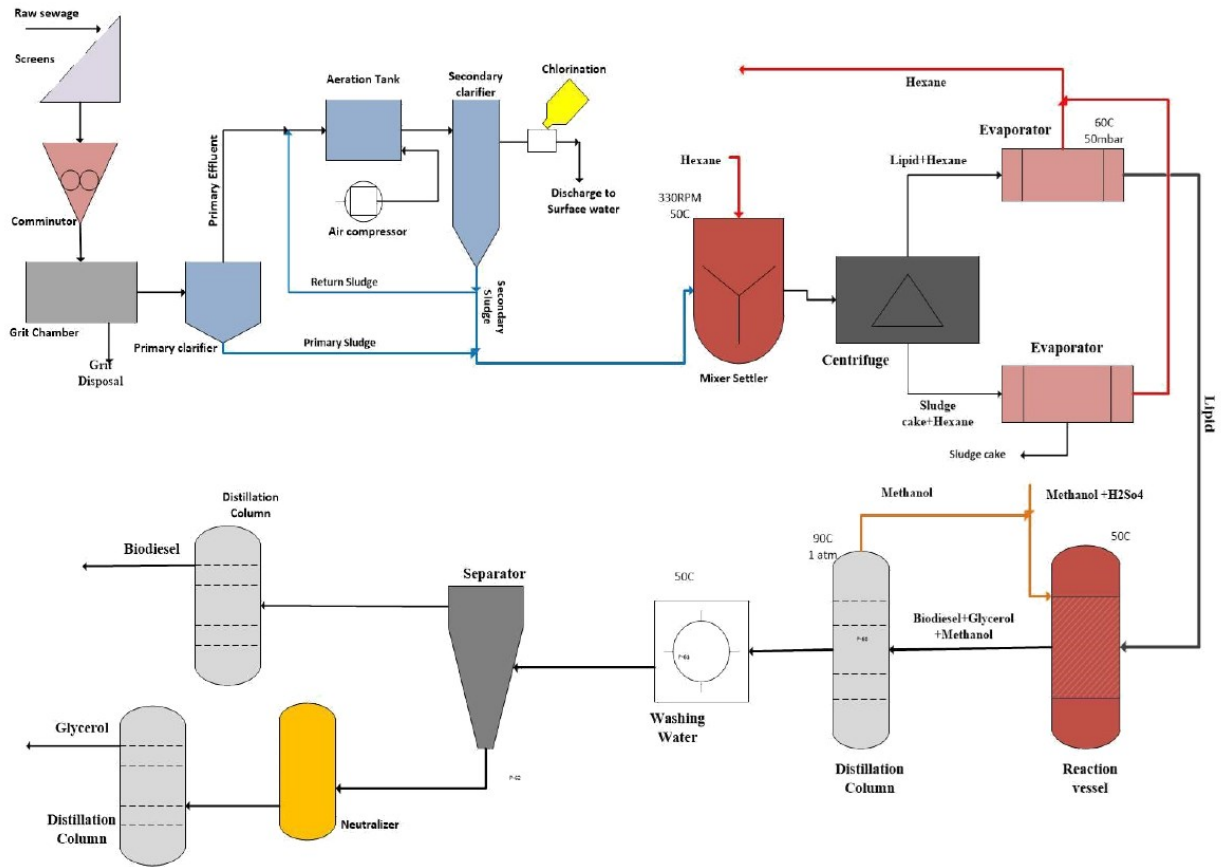


Figure 4.7 : Diagramme d'écoulement d'une bioraffinerie municipale (tiré de Usman, 2018)

4.8 Les boues municipales au Québec

En 2012, le Québec produisait 0,75 Mt de boues municipales par an, soit environ 100 kg par habitant par année. 30 % sont recyclées comme amendements fertilisants, 22 % sont mises en décharges avec captage partiel de biogaz et 48 % sont incinérées, essentiellement dans les grandes villes de la province, soient Montréal, Québec et Longueuil, ou brûlées dans des cimenteries comme c'est le cas à Laval (Hébert, 2012). De plus, la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles stipule qu'en 2020 il sera interdit d'éliminer des matières putrescibles (MDELCC, 2014b).

Sans nécessairement reprendre les mêmes paramètres d'opération qu'à la Figure 4.7, il est intéressant d'observer la possibilité de transformer, valoriser et peut-être même rentabiliser ce qui présentement est considéré comme une dépense pour les municipalités.

4.9 Capacité de distribution

La distribution des produits est un enjeu majeur pour la viabilité économique de projets industriels d'une telle envergure (Seider, Seader, et Lewin, 2004). Ainsi, surtout les circuits courts sont étudiés dans le présent cas. Il n'est pas impossible qu'il existe des marchés plus rentables à l'extérieur du Grand Montréal. Peu importe l'approvisionnement, le choix technologique effectué ou la méthode de distribution employée, les produits restent sensiblement les mêmes. Toutefois, leur niveau de pureté diffère selon ce qui a été retenu.

4.9.1 Biodiésel

L'Administration portuaire de Montréal (APM) termine son processus d'évaluation environnementale pour la première phase de l'agrandissement du terminal portuaire de Contrecoeur. Ce projet vise à accroître la quantité de conteneurs transbordés par l'APM. En plus de prévoir la construction d'un nouveau quai avec deux postes d'amarrage et d'une aire de manutention des conteneurs, il est aussi entendu d'aménager une cour ferroviaire intermodale et une gare de triage ainsi que les infrastructures d'accès et de soutien nécessaire. Pour le moment, cela exclut la construction de réservoirs. Pour citer l'étude d'impact : « Le nouveau terminal n'est pas un terminal pétrolier et vise seulement la manutention des marchandises conteneurisées ». En effet, seul le ravitaillement de la flotte de véhicules et d'appareils nécessitant du carburant sera réalisé sur les lieux, par camions spécialisés (SNC-Lavalin, 2017).

Cependant, l'APM n'est pas fermée à l'idée de revoir sa position sur la présence de réservoirs destinés au ravitaillement des navires si les opportunités se présentent. Premièrement, il faut qu'il y ait une offre de produits qui permettrait la construction d'un pipeline de biodiésel de Varennes jusqu'aux installations de

Contrecœur. Deuxièmement, il faut qu'il y ait une demande de la part des lignes maritimes pour se ravitailler à même les nouvelles installations de l'APM. Ce contexte est dans le domaine du possible (C. Deschambault, Directeur de l'environnement à l'APM, conversation téléphonique, 9 mai 2019).

Enfin, des artères ferroviaires parcourent déjà le parc industriel de Varennes. La distribution plus large du biodiésel au Canada ou aux États-Unis d'Amérique serait donc possible, mais sort du contexte symbiotique du projet.

4.9.2 Glycérol

Le glycérol peut être transporté par train, même s'il contient des traces d'éthanol, pourvu que les wagons utilisés soient appropriés. La proximité de l'autoroute 30 permet aussi le transport par camion. Advenant l'installation d'une nouvelle industrie nécessitant de grandes quantités de glycérol, il peut aussi être transformé sur place dépendamment de la sécurité des dérivés.

5. ÉTHYLÈNE BIOSOURCÉ

L'éthylène (C_2H_4) est la molécule la plus importante du marché des oléfines et des alcènes. L'éthylène est le monomère le plus produit de l'industrie pétrochimique. Il est nécessaire à la production de nombreux produits chimiques couramment utilisés, comme ceux à la Figure 5.1 (Al-Megren et Xiao, 2016).

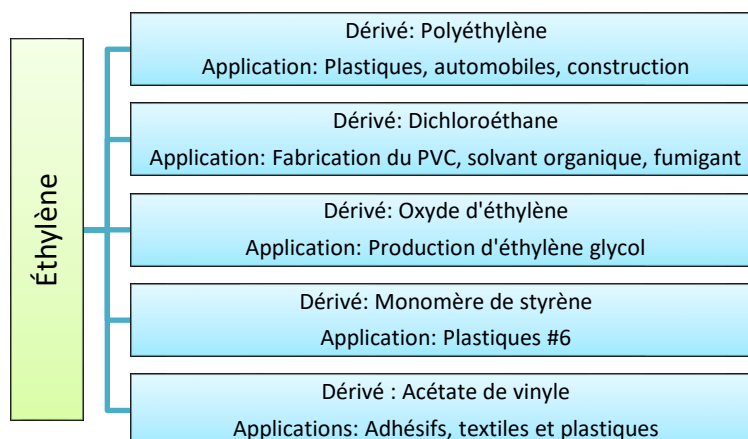


Figure 5.1 : Principaux produits dérivés de l'éthylène et leurs applications (traduit et adapté de Al-Megren et Xiao, 2016)

Le diagramme d'écoulement de la Figure C.1 à l'annexe 3 montre avec plus de précision les différents dérivés de l'éthylène et des réactions nécessaires afin de les obtenir.

5.1 Production et marché

Commercialement, l'éthylène est produit par le vapocraquage d'hydrocarbures issus des coupes légères de la distillation du pétrole (C_2 à C_{12}) (Mohsenzadeh, Zamani, Tahzadeh, 2017). Ces coupes peuvent se diviser en trois catégories, soit l'éthane (C_2H_6), les naphthas et le gaz de pétrole liquéfié (GPL), et un mélange de propane et de butane (Lewandowski, 2016). Cette transformation se fait à très haute température (800 °C) en présence de vapeur d'eau. La transformation peut aussi être faite par craquage catalytique sur lit fluidisé. Il est aussi possible d'obtenir de l'éthylène à petites échelles par déshydrogénation oxydative de l'éthane, transformation de méthanol en oléfine et par procédé Fischer-Tropsch (Al-Megren et Xiao, 2016).

La Figure 5.2 fait état du marché en 2016 tandis que la figure 5.3 tente de prédire la distribution du marché en 2021.

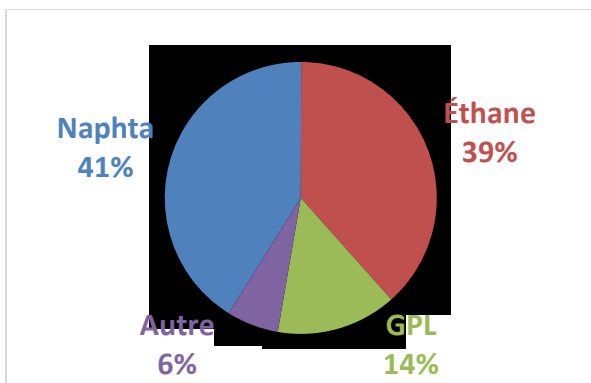


Figure 5.2 : Marché des précurseurs d'éthylène en 2016 (traduit de Lewandowski, 2016)

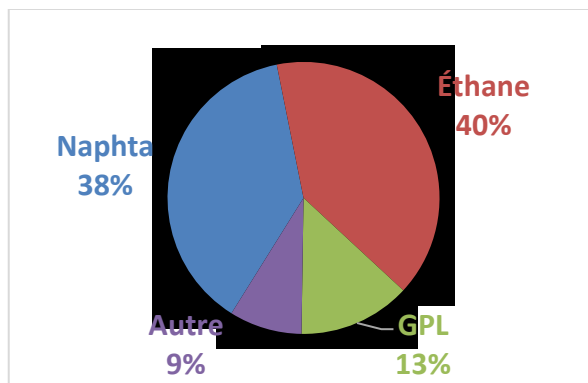


Figure 5.3 : Projection du marché des précurseurs d'éthylène en 2021 (traduit de Lewandowski, 2016)

Comme vu à la Figure 5.1, les dérivés de l'éthylène sont multiples. Le polyéthylène constitue approximativement 60 % de l'éthylène mondial consommé suivi par l'oxyde d'éthylène et le polychlorure de vinyle (PVC). Le marché mondial est en croissance. 146,1 Mt d'éthylène ont été produites par l'Homme en 2016. En 2021, cette production devrait atteindre 174,7 Mt, avec une croissance de 62 % des précurseurs « autres ». Ces hausses sont dues à l'augmentation de l'extraction de gaz naturel dans le monde. Une grande partie de cette augmentation de l'offre est due à la popularité de la fracturation hydraulique et de l'exploitation des gaz de schiste (Holloway et Rudd, 2013). L'éthane composant une partie non négligeable de ce mélange est donc disponible en plus grande quantité (Lewandowski, 2016).

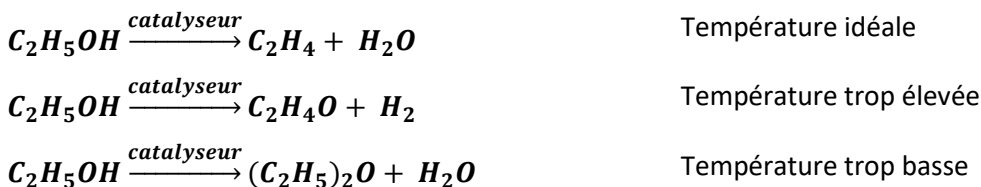
Les grandes régions productrices sont l'Asie, le Moyen-Orient et l'Amérique du Nord. Malgré sa production domestique importante, l'Asie consomme tellement d'éthylène qu'elle en est une importatrice nette (Al-Megren et Xiao, 2016) (Lewandowski, 2016). Le prix de l'éthylène sur le marché est directement lié à la valeur de la matière première transformée. En 2016, le craquage du naphta coûte 1000 USD par tonne comparativement au craquage de l'éthane qui en coûte entre 300 et 400 USD (Al-Megren et Xiao, 2016). En 2020, la capacité mondiale d'éthylène sera de 200 Mt (Eramo, s. d.).

Les figures 5.1, 5.2, et 5.3 confirment que l'éthylène et tous ses produits dérivés sont fortement dépendants de la matière organique fossile. Cependant, tel que le révèle la Figure C.1 de l'annexe 3, il existe une autre alternative. En fait, la réaction de l'éthylène en éthanol n'est pas à sens unique. Il est aussi possible de transformer l'éthanol en éthylène. C'est une des portes vers la chimie verte.

5.2 Déshydratation catalytique de l'éthanol

La déshydratation catalytique de l'éthanol est une méthode alternative de production d'éthylène. C'est une réaction endothermique nécessitant 1632 J/g d'éthylène produits. Donc, le rendement de la réaction

dépend directement de la température. De plus, la température influence aussi sur la sélectivité du produit obtenu. La température idéale de réaction varie entre 300 et 500 °C. Autrement, la transformation chimique risque de produire de l'acétaldéhyde (équation 2) ou de l'éther diéthylique (équation 3) (Morschbacker, 2009) (Zhang et Yu, 2013) (Fan, Dai, Wu, 2013).



5.3 Réacteurs

Les conditions d'opérations sont, somme toute, énergivores. Premièrement, la réaction de déshydratation doit se faire avec l'éthanol sous forme gazeuse.

Tableau 5.1 : Synthèse des technologies de déshydratation de l'éthanol vers l'éthylène (aggloméré et résumé de Zimmermann et Walzl, 2000; Morshbacker, 2009; Zhang et Yu, 2013; Kochar, Merims et Padia, 1981; et Mohsenzadeh et al., 2017)

Type de réacteur	Procédé	Température d'opération [°C]	Temps de résidence [h]	Régénération du catalyseur	Taux de conversion [%]	Sélectivité molaire [%]
Isotherme, tubulaire à lit fixe	Catalyseur placé à l'intérieur des tubes où passe aussi l'éthanol Fluide caloporteur chaud à l'extérieur de la paroi	330 - 380	0,2 - 0,4	Tous les 1 à 6 mois	98 – 99	95 - 99
Adiabatique à lit fixe	Série de réacteurs ayant un garnissage de catalyseur L'éthanol est ajouté au mélange avant chaque passage	450 - 500	0,15 - 0,5	Tous les 6 à 12 mois	99	97 - 99
Adiabatique à lit fluidisé	Catalyseur à l'état granulaire fluidisé avec l'éthanol	400	n.d.	Non nécessaire	99,5	99,9

Deuxièmement, les températures des réacteurs sont élevées. Finalement, sans travailler à des pressions énormes, il faut compresser l'éthanol entre 100 et 500 kPa (Mohsenzadeh et al., 2017). Différentes technologies existent pour accomplir la transformation de l'éthanol en éthylène. La littérature rapporte trois types de réacteurs principalement. Ceux-ci sont résumés au Tableau 5.1.

5.4 Catalyseurs

À l'origine, la réaction de déshydratation s'effectuait à l'aide de catalyseur à base d'acide phosphorique. L'éthylène produit de cette façon a une bonne pureté. Cependant, ce procédé désactive le catalyseur. Pour cette raison, cette méthode n'est plus utilisée depuis 1950 (Zhang et Yu, 2013).

Actuellement, l'industrie de l'éthylène se sert surtout de catalyseurs à base d'alumine activée (Al_2O_3). Le catalyseur est stable et la pureté de l'éthylène produit est élevée. Cependant, pour garder un équilibre de réaction favorisant la formation d'éthylène, il est nécessaire de garder la concentration d'éthanol à un certain niveau. Autrement, la cinétique de réaction nécessite de plus hautes températures et un temps de résidence plus grand (Zhang et Yu, 2013) (Mohsenzadeh et al., 2017). Ultimement, cela augmente les coûts en énergie et en production ou installations.

Certains tamis moléculaires agissent en catalyseurs et possèdent une activité moléculaire supérieure aux catalyseurs à base d'alumine activée. De plus, les tamis moléculaires opèrent à de plus basses températures et sont même capables d'œuvrer sur de l'éthanol en solution aqueuse. En revanche, ils coûtent très cher, sont compliqués à préparer, sont moins stables et se désactivent facilement. Il est nécessaire de savoir qu'ils existent, mais ils ne sont pas réellement utilisables pour une production de taille industrielle (Zhang et Yu, 2013).

Les hétéropolyacides sont aussi des catalyseurs intéressants. Il s'agit d'un multiacide contenant de l'oxygène, constitué d'un atome central (comme du P, Si, Ge, Fe ou Co) et d'un atome ligand (comme Mo, W, V, Nb, ou Ta). Ils peuvent être utilisés pour faire une catalyse acide ou encore pour de l'oxydoréduction (Mizuno et Misono, 1997). Pour la déshydratation de l'éthanol, ces acides ont une activité et une sélectivité élevée et une faible température de réaction. Habituellement, ce type de catalyseur doit être chargé sur une matrice ce qui amène des pertes et augmente les coûts de préparations (Vázquez et al., 2000) (Varisli, Dogu et Dogu, 2010).

5.5 Technologies industrielles actuelles

À titre d'exemple, Mohsenzadeh et al. (2017) énumèrent différentes technologies utilisées par les plus grandes compagnies actives dans le domaine. Parmi ces dernières se trouvent Axen, Braskem, British Petroleum (BP), Chematur, IFPEN, et Total. Les tailles de leurs usines varient et elles produisent entre 5 000 et 400 000 tonnes d'éthylène par année. Au Brésil, Braskem opère une usine de fabrication de polyéthylène à partir de canne à sucre. Cette usine consomme environ une fois et demie la production

annuelle anticipée de la distillerie de Varennes, soit, 462 millions de litres d'éthanol. Braskem est ainsi en mesure de produire 200 000 tonnes de polyéthylène par an (Chemicals technology, s. d.).

5.6 Train technologique proposé

Mohsenzadeh et al. (2017) font la simulation d'une usine de transformation de l'éthanol en éthylène. Ils visent à produire de l'éthylène atteignant les spécificités nécessaires pour être polymérisé. Cependant, ils partent de deux bases de calculs différentes. Dans un premier cas, ils prennent un éthanol pur à 95 %. Dans un second cas, ils font une analyse de sensibilité sur la pureté de l'éthanol. Le désign de leur simulation produit 180 000 tonnes d'éthylène par année, soit 8000 heures de production. Pour atteindre cette production, le procédé simulé consomme 337 500 tonnes d'éthanol. À titre comparatif, en prévoyant augmenter sa production à 300 000 000 litres (ou 236 700 tonnes) par année, Greenfield Global produit 70 % de la simulation réalisée. Il est donc raisonnable de penser que les conclusions tirées par Mohsenzadeh et al. soient aussi valables pour un scénario comme celui du parc industriel de Varennes. Afin de donner une idée générale des conditions d'opération d'un tel procédé, le Tableau 5.2 présente les températures, pressions et le nombre de réacteurs impliqués dans le cas à l'étude.

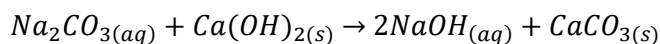
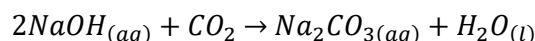
Tableau 5.2 : Conditions d'opérations de déshydratation de l'éthanol pour faire de l'éthylène (adapté de Mohsenzadeh et al., 2017)

Paramètres	Valeur
Nombre de réacteurs adiabatiques	4
Température de préchauffe de l'intrant [°C]	82
Température des réacteurs [°C]	425
Température de sortie du dernier réacteur [°C]	370
Température du produit sortant avant la séparation [°C]	90
Pression de réaction [bar]	1-5

La Figure C.2 de l'annexe 3, développe un peu plus le procédé de déshydratation. De plus, il est important de noter que le flux de matière sortant du dernier réacteur est suffisamment chaud pour justifier une récupération de la chaleur utilisée pour produire de la vapeur. Celle-ci serait utilisée pour faire la préchauffe de l'intrant. Par la suite, l'eau chaude condensée pourrait être envoyée aux chaudières de l'usine d'éthanol. C'est un exemple évident de mutualisation de flux possible.

5.7 Séparation

Les principaux produits à séparer sont du gaz carbonique, de l'eau et l'éthanol qui n'a pas réagi. De plus, bien qu'une sélectivité de réaction de l'ordre de 98 % soit atteinte, d'autres sous-produits existent. Le CO₂ est estimé à une concentration de 1600 ppm. Le traitement de ce dernier se fait par une colonne d'absorption alcaline au NaOH. Elle produit ainsi du carbonate de sodium (Na₂CO₃). L'hydroxyde de sodium est régénéré en mélangeant de l'hydroxyde de calcium (Ca(OH)₂) au carbonate de sodium. La réaction d'absorption alcaline du CO₂ par l'hydroxyde de sodium va comme suit :



La majorité de l'eau est retirée en passant dans une colonne de trempe. Par la suite, une série de compresseurs et de refroidisseurs permet de condenser le reste de l'eau. Quant au CO₂, il est retiré par une colonne d'absorption caustique (NaOH). Le reste de l'eau est retiré par un tamis moléculaire. Après cette étape, l'effluent d'éthylène est pur à 99,2 % et est envoyé à la purification (Mohsenzadeh et al., 2017).

5.8 Purification

Grosso modo, la purification se fait par une cryodistillation à deux étapes. L'effluent est d'abord refroidi à -28 °C puis il passe dans deux colonnes de séparation où, dans un premier temps, la coupe lourde composée à 65,2 % d'éthylène et à 34,8 % de divers produits (propylène, butadiène, diéther, acétaldéhyde et éthane) est retirée. Par la suite, c'est au tour de la fraction légère d'être séparée. Celle-ci est composée à 93,5 % d'éthylène et à 6,5 % d'un mélange d'hydrogène et de méthane. Le produit final sortant est de l'éthylène à 99,97 % (Mohsenzadeh et al., 2017).

5.9 Sensibilité de l'éthanol

Quatre types d'éthanol ont été étudiés dans la simulation de Mohsenzadeh et al. (2017) soit, le E95, E100, E87 et le E87_{cellulose}. L'éthanol cellulosique a pour différence qu'il comporte aussi du furfural, de l'acide acétique et de l'acétone. Il est estimé que la composition de l'éthanol n'influence pas la pureté atteignable d'éthylène. Cela aura quand même une influence sur les coûts de production, de séparation et de purification.

6. PONDÉRATION ET ANALYSE

Pour comparer différentes hypothèses dans les symbioses industrielles, les critères pertinents d'analyse doivent être clairs. Cette évaluation est découpée selon les grandes sphères du développement durable, c'est-à-dire, la sphère technoéconomique, la sphère environnementale et la sphère sociale. L'évaluation se base sur les limites de la symbiose industrielle présentée précédemment. À l'instar de Kalundborg et des autres modèles de symbioses industrielles, les modèles suggérés pour le concept varennois ont le potentiel d'être exportés ailleurs dans le monde. Un 4^e volet distinct des sphères traditionnelles du développement durable est ajouté à l'étude. Il porte le néologisme « d'exportabilité ».

6.1 Pondération

L'évaluation des critères d'analyses se fait sur une échelle de -2 à 2. La grille d'évaluation est présentée au Tableau 6.1 :

Tableau 6.1 : Cotes de pondérations et leur justification

Score	Justification
-2	L'évaluation est très négative. Il n'existe presque aucun élément positif pour contrebalancer les répercussions anticipées.
-1	L'évaluation est négative. Même s'il y a de la nuance à apporter, dans son ensemble, l'élément évalué comporte des désavantages plus importants que des avantages.
0	L'évaluation est neutre ou il est impossible de se prononcer. Lorsque les avantages et les inconvénients sont aussi importants les uns que les autres, un score de 0 est attribué. Il en va de même lorsque trop de données sont manquantes pour prendre une décision.
1	L'évaluation est positive. Somme toute, les avantages sont plus importants que les inconvénients.
2	L'évaluation est très positive. Les inconvénients sont inexistantes ou mineurs. Il n'y a que des avantages.

6.2 Technoéconomique

Les critères technoéconomiques se basent sur les critères de faisabilité d'Adoue (2007) (voir la Figure 2.3) soit le qualitatif, la technique, le quantitatif et l'économique. Le critère réglementaire n'est pas analysé puisque l'essai s'inscrit dans une projection où les règlements concernant l'usage d'éthanol carburant seront nécessairement différents, voir obsolètes.

6.2.1 Faisabilité technique

La faisabilité technique traite des aspects de réalisation des projets de symbioses industrielles et se découpe en trois morceaux. Les trois volets évalués sont jugés d'une importance similaire. La pondération de la faisabilité technique est donc une moyenne de ces volets.

- Qualitatif

L'aspect qualitatif considère la qualité des flux de matières, d'énergies et de personnels nécessaires dans un territoire donné. Chaque transformation supplémentaire contribue négativement.

- Technique

La maturité technologique ainsi que les défis techniques et logistiques entre deux formes de symbioses industrielles sont comparés. Ainsi, d'un point de vue de faisabilité, les concepts les plus simples sont plus facilement réalisables. Des techniques couramment utilisées sont évaluées positivement alors que des difficultés ou des impossibilités techniques sont jugées négativement.

- Quantitatif

Il est important que les différents flux soient présents en quantité suffisante dans l'évaluation des hypothèses de symbioses complémentaires. Une évaluation négative est donnée pour toute importation significative de matière première ou d'énergie alors que des surplus de flux sont évalués positivement.

6.2.2 Sensibilité économique

Les projets industriels réalisés s'inscrivent dans une dynamique de marchés pouvant varier à travers le temps. Les défis financiers auxquels les entreprises doivent répondre sont multiples. Un projet durable est solide à travers le temps. Il est donc important d'évaluer sa viabilité économique. Ce point est une estimation un peu plus subjective et découle plutôt d'une évaluation personnelle de la robustesse d'un projet. Il est évalué dans l'appréciation de l'ensemble de sa résilience. Le raisonnement est détaillé selon les trois points suivants :

- Réponse à une demande

Les projets doivent répondre à une demande. Plus un concept est susceptible de répondre en quantité suffisante aux besoins d'un secteur, plus il est considéré positivement.

- Stabilité de la demande

Les besoins auxquels les projets répondent sont susceptibles de varier à travers le temps. Ainsi, l'essor d'une nouvelle technologie, en rendant une autre désuète, risque de transformer les besoins mondiaux.

- Sensibilité aux variations des coûts.

Les prix de l'énergie, de la matière première et des produits vendus évoluent chaque jour. Cette volatilité est un des principaux éléments influençant la rentabilité d'une usine. Ainsi, le seuil de rentabilité ou les projections dans la variabilité des coûts sont analysés.

6.3 Environnemental

Les impacts environnementaux d'un développement industriel ne peuvent être nuls. Cependant, dans le cadre de cet essai, il est plutôt question d'évaluer les déplacements et réductions des impacts environnementaux par la création de symbioses industrielles et s'il y a lieu de mettre en évidence certains « effets rebonds » potentiels. Les enjeux évalués ont trait aux caractéristiques physiques de l'environnement (air, eau, sol) et à ceux qui y habitent (faune et flore). Toutes améliorations des conditions de l'environnement sont évaluées positivement alors qu'une dégradation est jugée négativement. La faune et la flore vivent dans un environnement physique. L'évaluation environnementale est une moyenne du score attribué à chacun des volets.

6.3.1 Caractéristiques physiques de l'environnement

L'exploitation de différentes synergies et la création de symbioses industrielles ont un impact sur l'environnement. Dans cet ordre d'idée, la substitution de matière première vierge par des matières résiduelles d'une entreprise locale a des conséquences favorables ou non sur l'environnement. Ce sont ces conséquences qui sont évaluées et comparées.

6.3.2 Caractéristiques du vivant

Les changements environnementaux évalués en 6.3.1 ont une incidence sur le vivant. L'aboutissement de ces impacts est aussi comparé pour la faune et la flore.

La carboneutralité du modèle joue pour beaucoup dans l'évaluation de ce dernier. Un autre facteur important à considérer est celui de la pérennité environnementale que le modèle apporte. Le sujet est traité d'une façon similaire à la « réponse à une demande » abordée au point 6.2.2. Il s'agit d'évaluer sous une lunette environnementale la durabilité d'un projet, nonobstant sa viabilité économique.

6.4 Sociétal

Les meilleures pratiques en communication démontrent qu'il est difficile de prévoir la réaction des êtres humains à l'annonce d'un projet industriel (Y. Fréchette, notes du cours ENV 826, 29 octobre 2018). L'évaluation de l'aspect sociétal se fait plutôt à l'égard de l'atteinte d'objectifs en matière de protection de l'environnement, promotion du territoire, et développement stratégique. Un pas dans cette direction

est considéré comme positif alors que l'inverse est jugé négativement. Contrairement aux deux sphères précédentes, la sphère sociétale n'est pas pondérée par l'évaluation de ses sous-éléments. Elle est directement évaluée.

6.5 Exportabilité du modèle

Dans la mesure du possible, un commentaire est fait sur les endroits dans le monde où le modèle de symbiose étudié pourrait à priori être déployé. L'évaluation pour ce point ne peut pas être négative. Un score nul est attribué s'il est impossible d'exporter un scénario. Ce point est ajouté à l'évaluation afin de déterminer, malgré un contexte québécois défavorable, si un scénario n'aurait pas un avantage comparé à un autre sur la scène internationale.

7. ANALYSE DU BIODIÉSEL

Après le développement sur la production du biodiésel et du glycérol, il faut déterminer la faisabilité d'un modèle québécois d'usine de transestérification de triglycérides par l'éthanol.

7.1 Technoéconomique

Pour ce faire, il faut d'abord vérifier si le projet est techniquement réalisable et s'il est viable en contexte québécois.

7.1.1 Faisabilité technique

La faisabilité technique implique des approvisionnements de qualité transformés efficacement en quantité suffisante. Est-il possible de fabriquer un ester éthylique à partir de lipides récupérés dans les environs de Varennes? La réponse se rapproche plus d'un « peut-être » que d'une affirmation positive.

- **Qualitatif**

Les matières lipidiques sont faciles à trouver. Le secteur agroalimentaire sur l'île de Montréal et dans la couronne sud est abondant. De plus, les technologies permettant de valoriser la matière grasse contenue dans les boues d'épuration donnent accès à des concentrations intéressantes. Cependant, la constance dans la qualité de la matière première peut fluctuer, ce qui est un enjeu considérable pour les investisseurs.

- **Technique**

Les défis techniques pour transformer des triglycérides et de l'éthanol en ester d'éthyle et glycérol sont faibles. Les technologies, bien que non exploitées sous cette forme, sont matures. Le plus grand défi consiste à se procurer suffisamment de matières grasses.

- **Quantitatif**

L'hypothèse de la réorientation d'une partie ou de l'entièreté de la production actuelle d'éthanol pose le défi des tonnages. La faisabilité technique réside dans la logistique et dans l'approvisionnement de 885 000 tonnes de matières grasses, s'il faut transformer tout l'éthanol. Il est impossible de se procurer autant de gras au Québec. En effet, en 2016, les États-Unis d'Amérique ont transformé seulement 635 000 tonnes de gras en biodiésel (Parker et Paton, 2017, 3 mai). Il est donc déraisonnable de penser faire mieux, ici, à partir de l'industrie alimentaire seulement. C'est d'ailleurs une question qui reste non résolue. La revue de littérature et les entrevues ne permettent pas de déterminer avec précision la taille de l'industrie de la graisse récupérée au Québec. Cependant, un rapport de 2013 brosse le portrait du

gisement de résidus organiques de l'industrie agroalimentaire dans la province et estime grossièrement la quantité d'aliments consommables gérés comme des résidus par les ICI de la filière de l'alimentation. Ces informations sont au Tableau D.1 de l'annexe 4. L'industrie alimentaire québécoise génère 1 286 000 tonnes/an de matières organiques, toutes catégories confondues. Les entreprises œuvrant dans le code SCIAN 3116, fabrication de produits de la viande, sont celles qui génèrent le plus de résidus organiques. Cependant, elles gèrent au mieux leurs résidus, puisqu'elles n'enfouissent que 0,056 % (311 tonnes annuelles) de ceux-ci (Solinov, 2013).

En fait, peu de matières sont envoyées à l'enfouissement parce que les huiles végétales usées et les gras animaux sont faciles à recycler. En effet, ce qui ne sert pas à faire du savon et qui n'est pas utilisé par l'industrie cosmétique est retourné dans la moulée servie au bétail ou entre dans la fabrication de nourriture pour animaux de compagnie (Sanimax, 2019) (Rothsay 2019). Le reste de la matière organique est valorisé par méthanisation, épandage et autres formes de traitements biologiques ou thermiques (Solinov, 2013).

Qui plus est, l'entreprise Rothsay possède déjà une usine de biodiésel sur la rive sud de Montréal. Sans connaître précisément la proportion de chaque intrant, elle opère uniquement à partir de H&G récupérées (végétales et animales). Ainsi, la construction d'une nouvelle usine de biodiésel ajoute de la compétition dans un marché où les H&G récupérées de qualité sont déjà en quantités limitées. (Guillemette, 2019).

7.1.2 Sensibilité économique

Advenant la possibilité de se procurer de la matière première en quantité suffisante, il y a un profit considérable à réaliser dans la production de EÉAG.

- Réponse à une demande.

La navigation territoriale est incluse dans le bilan GES national. Puisque l'IMO veut réduire ses émissions de GES de 50 %, il aura besoin d'une réponse à long terme. Pour l'instant la solution de transition envisagée est l'utilisation de GNL, qui ne correspond qu'à une réduction, au plus, de 20 % des émissions. La carboneutralité du biodiésel répond à une partie de cette demande pour les lignes maritimes qui circulent dans le réseau national des eaux difficiles à naviguer comme les fleuves et rivières.

- Stabilité de la demande

La stabilité de la demande est surtout dépendante des besoins en imports et en exports internationaux, du commerce intérieur et des lignes de ravitaillements et de traversiers. Pour l'est du Canada, il est, entre

autres, question de ravitailler l'île de Terre-Neuve et les Îles-de-la-Madeleine ou encore de subvenir aux besoins en carburant des différents traversiers qui desservent le Saint-Laurent.

- Sensibilité aux variations des coûts

L'approvisionnement en huiles et en graisses est le plus grand facteur d'incertitude du projet. Le deuxième grand facteur d'incertitude est la non-existence de prix publics du marché des H&G. Des hypothèses semi-arbitraires sur la quantité d'H&G récupérables établissent le prix du seuil de sensibilité. En supposant l'accès à 60 000 tonnes de H&G recyclées, quelle quantité d'éthanol est nécessaire chez Greenfield Global pour transformer toute cette masse, et quel doit être le prix d'achat des H&G pour équivaloir aux ventes du biodiésel et du glycérol découlant de la transformation de l'éthanol? À noter que l'éthanol complémentaire non transformé en biodiésel n'est pas pris en compte puisqu'il s'agit du modèle d'affaires traditionnel de l'entreprise.

Tableau 7.1 : Calcul du seuil de rentabilité des H&G (prix de vente tirés et calculés à partir de Oleoline, 2018; Ship&bunker, 2019; Markets insider, 2019)

	Dépenses		Éthanol transformé	Ventes		
	H&G	NaOH		Éthanol restant	Biodiésel	Glycérol
Tonnage	60 000	684	16 034	220 666	63 000	18 795
Prix de vente [\$ /tonne]	948 \$	550 \$	509 \$	509 \$	580 \$	1 102 \$
Dépenses et ventes	56 800 000 \$	376 000 \$	8 160 000 \$	112 300 000 \$	36 500 000 \$	20 710 000 \$
Seuil de rentabilité	57 200 000 \$				57 200 000 \$	

Donc, pour transformer 60 000 tonnes de triglycérides, il faut un peu plus de 16 000 tonnes d'éthanol et 684 tonnes d'hydroxyde de sodium. Aux prix courants, ce sont 8 160 000 \$ de vente d'éthanol en moins pour en gagner 57 200 000 \$ en plus des 112 300 000 \$ de ventes d'éthanol restant. Le seuil de rentabilité se trouve à 948 \$ la tonne de H&G recyclée. Cet indice semble crédible puisque le suif de bœuf se négociait entre 680 et 1100 USD sur le marché international entre janvier 2016 et juillet 2017 (The Land, 2017, 21 septembre). En somme, en supposant un prix d'acquisition de 680 \$/tonne, la transformation des 60 000 tonnes de H&G permettrait à l'entreprise d'augmenter la valeur de ses ventes de 13 %.

Ces données doivent être nuancées, car l'industrie québécoise de la fabrication de la viande recycle et valorise très bien ses matières organiques dans des filières existantes. Il s'agit à la fois d'une preuve que les H&G animales ont une valeur suffisamment grande pour qu'il y ait un intérêt économique à les

revaloriser et que ces H&G usées sont actuellement prises en charge. Un nouveau joueur majeur dans l'industrie aurait une influence sur les prix de la matière première.

7.2 Environnemental

Une des assises sur laquelle repose l'idée de transformer des résidus alimentaires en carburant est d'éviter les boucles de recirculation sans fin. Plus précisément, à chaque fois qu'une transformation est réalisée, il y a des pertes liées à la non-idéalité du système et au transport. En prenant l'exemple des huiles et graisses animales récupérées, il est possible de les utiliser comme additif alimentaire pour élevage. Cette boucle semi-fermée est tout de même un non-sens, puisque des calories d'origines animales alimentent des animaux avec une efficacité inférieure à 100 %. Ultimement, chaque gramme recyclé de cette façon est en partie gaspillé. Ce non-sens logistique est entretenu par la quasi-gratuité des énergies nécessaires à la transformation et au transport de produits retournés dans la chaîne de production.

Idéalement, briser cette chaîne de l'absurde et épurer le cycle du carbone requiert que la seule transformation nécessaire pour l'alimentation humaine soit le travail réalisé par la photosynthèse des plantes.

Similairement à l'analyse de l'éthylène qui vient plus loin, il est question ici de discuter des effets de la construction d'une nouvelle usine et des conséquences de l'utilisation du produit sortant à l'intérieur du paradigme auquel il se souscrit.

7.2.1 Caractéristiques physiques de l'environnement

Le projet analysé offre des produits biosourcés sur le marché local. Puisque le glycérol produit est peu réactif, ne comporte presque pas de risque et est produit en plus petite quantité que le biodiésel, les effets environnementaux du premier sont considérés comme nuls par rapport à ce dernier.

L'IMO entend diminuer ses émissions de GES de 50 % d'ici 2050, elle n'aura pas d'autre choix que de forcer les compagnies maritimes à abandonner les HFO pour qu'elles se tournent vers un carburant carboneutre. Ces options sont diversifiées et chacune peut répondre à certains besoins précis en matière de transport. Dans cet ordre d'idée, les annonces se multiplient en ce qui concerne les GNL. Notamment, il y a de plus en plus d'articles concernant les navires opérant à l'hydrogène ou à l'électricité (Berti, 2019). Il est même question d'un retour de la voile (Misra-Godwin, 2016). Ainsi, l'utilisation de biodiésel s'inscrit parmi ces alternatives et, dans les limites de l'essai, peut difficilement se comparer à toutes les autres promesses par l'industrie maritime. Il faut donc le considérer et l'analyser comme tel.

Les composantes du sol et de l'eau ne devraient pas être affectées par la construction d'une usine de biodiésel puisque les terrains sont déjà de nature industrielle. Le biodiésel comporte aussi plusieurs avantages environnementaux comparativement à son homologue pétrolier. Premièrement, il est plus sécuritaire à manipuler et à transporter. En effet, il est légèrement plus visqueux, même que sa tension de vapeur plus basse l'éloigne du comportement inflammable (Natural Resources Canada, 2018). Le biodiésel est plus biodégradable que le diésel pétrolier et moins toxique que ce dernier (Ressources naturelles Canada, 2015). Cependant, les effets environnementaux d'un déversement de biodiésel restent considérables et affectent dans une moindre mesure, mais de manières similaires, les composantes du sol et de l'eau (Natural Resources Canada, 2018).

La composante de l'air est améliorée lors de la combustion. Une plus faible quantité de particules fines est relâchée comparée au HFO. Considérant la teneur faible en soufre du biodiésel (plus petit que 0,5 %), la quantité d'aérosols et d'oxydes de soufre (SO_x) est aussi amoindrie. D'ailleurs, la quantité de monoxyde de carbone (CO) et d'hydrocarbures rejetés est généralement plus faible pour le biodiésel que pour un diésel conventionnel. Cependant, Ressources naturelles Canada indique qu'une plus grande émission d'oxydes d'azote (NO_x) est observée. Comparativement au diésel, le biodiésel carboneutre offre la possibilité de réduire les émissions de GES de plus de 80 % pendant son cycle de vie (Ressources naturelles Canada, 2015). Du moins c'est la réalité pour le EMAG d'origine biologique. De plus, puisqu'il est question d'EÉAG, les chaînes carbonées sont plus longues, la viscosité du produit devrait donc en être augmentée. Il est raisonnable de postuler que les conclusions pour le biodiésel méthylique s'appliquent aussi au EÉAG.

7.2.2 Caractéristiques du vivant

Les impacts sur la faune et la flore sont peu reliés au type de carburant diésel utilisé. À l'exception d'un déversement, les effets ressentis par le vivant sont plus souvent liés au passage même des navires et à tout l'appareil de maintien du commerce via le Saint-Laurent (SNC-Lavalin, 2017). Les effets sur la faune sont donc les mêmes que ceux déjà observés par le commerce maritime actuel utilisant du diésel marin.

7.2.3 Pérennité ou résilience du modèle

Il est difficile de prévoir ce que réservent les cinquante prochaines années. L'idée de parcourir un cours d'eau en faisant fi des éléments ou du courant ne date pas d'hier (Horseboating society, 2003) et c'est dans ce contexte que se place l'utilisation d'un biodiésel marin. Des solutions à ce problème ont existé dans le passé et d'autres alternatives au biodiésel existent aussi. Le biodiésel n'est donc pas la seule réponse disponible pour la motorisation des navires sur les fleuves, grandes rivières et chenaux dans un monde en transition postpétrole.

7.3 Sociétal

Sans être une panacée, la production de diésel et de glycérol renouvelables peut au moins être vue d'un œil favorable par la société sous deux pans différents. Premièrement, et sans tomber dans le *greenwashing*, c'est une façon de valoriser les terres agricoles locales, en s'affranchissant du pétrole pour le commerce maritime, et d'obtenir un glycérol à valeur ajoutée aux applications multiples. Selon le baromètre de la consommation responsable, le Québécois est friand de la consommation locale (Caillou, 2017, 25 novembre) (Observatoire de la consommation responsable, 2018). Ce dernier peut donc se réjouir d'une corde de plus à l'arc de l'indépendance énergétique provinciale. Deuxièmement, même si proportionnellement le secteur du transport maritime ne contribue qu'à 3 % des émissions de gaz à effet de serre, la transition vers un carburant dit carboneutre est bonne pour l'atteinte des objectifs de réduction que les différents paliers de gouvernance se sont donnés.

7.4 Exportabilité du modèle

À l'étape industrielle, la production de biodiésel (EÉAG) ne nécessite en grande majorité que deux grands intrants, soit de l'éthanol et des triglycérides contenus dans les H&G animales et végétales. Ainsi, les paramètres propices à une symbiose industrielle visant à produire des EÉAG sont favorisés par une implantation en milieux ruraux près des usines de transformations agroalimentaires où les matières premières seront disponibles.

L'énoncé précédent à lui seul n'est pas suffisamment précis pour justifier une zone ou un endroit particulier sur la planète. C'est pourquoi il faut ajouter deux filtres supplémentaires observant, dans un premier temps, les pays possédant les plus grands élevages bovins et porcins. Dans un second temps, il faut aussi juxtaposer ces grandes productions animales à la production d'éthanol.

Premièrement, la Figure 7.1 montre que les plus grands producteurs bovins dans le monde sont le Brésil et l'Inde, suivi par les États-Unis d'Amérique et la Chine.

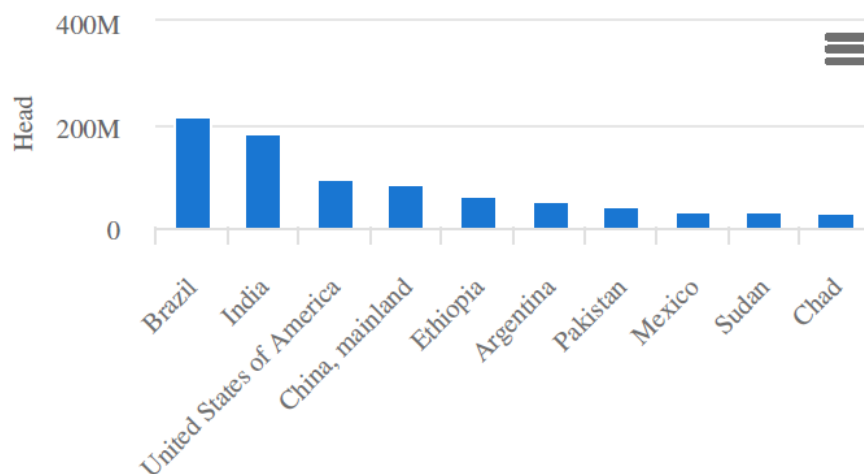


Figure 7.1 : Les 10 plus grands cheptels bovins dans le monde en 2017 (tiré de FAO, 2019)

Quant à cette dernière, la Figure 7.2 montre qu'elle est de loin le plus grand producteur porcin au monde. Ainsi, les pays à cibler sont la Chine, le Brésil, l'Inde et les États-Unis d'Amérique.

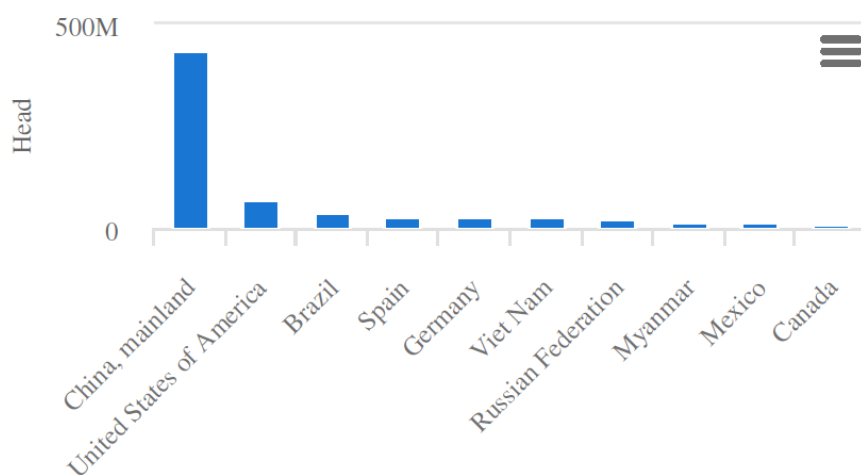


Figure 7.2 : Les 10 plus grands élevages porcins dans le monde en 2017 (tiré de FAO, 2019)

Deuxièmement, l'éthanol est produit principalement à partir de maïs ou de canne à sucre. La Figure 7.3 montre les densités de production de canne à sucre dans le monde. En y ajoutant les données de la Figure 8.5 sur la localisation des grandes productions mondiales de maïs, les pays producteurs des matières premières nécessaires à la fermentation éthylique sont aussi ceux produisant le plus de bœufs et de porcs.

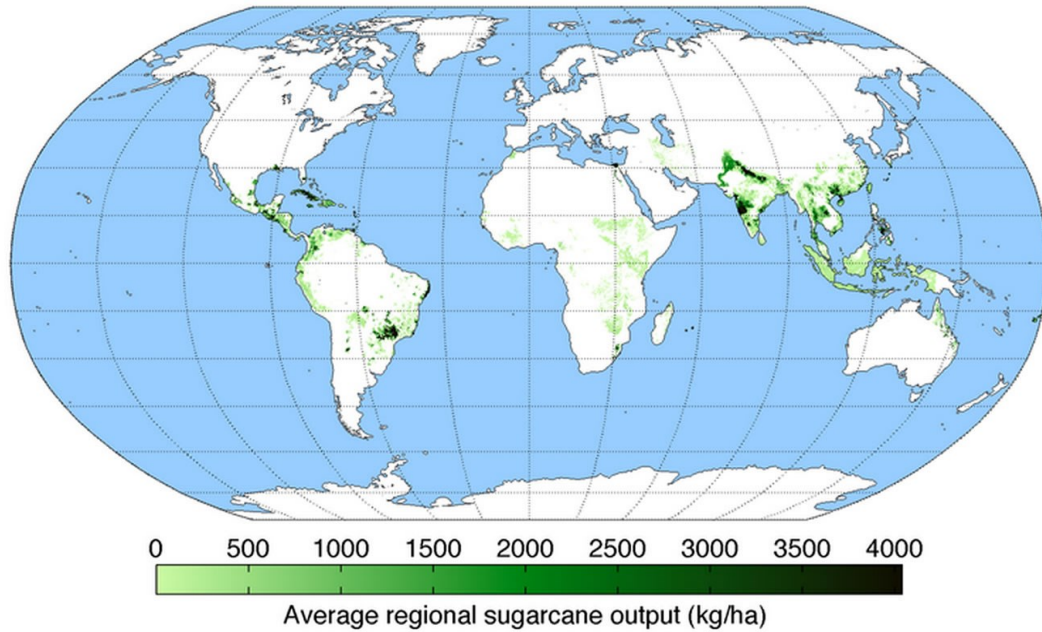


Figure 7.3 : Répartition mondiale de la production de canne à sucre en 2000 (kg par hectare) (compilé par l’Institut d’Environnement de l’Université du Minnesota; Monfreda, Ramankutty, et Foley, 2008)

Le modèle de symbiose « éthanol-biodiésel » est donc considéré comme exportable dans les quatre pays précédemment ciblés. De plus, selon le *U.S. Census Bureau* (2019), ces pays font partie du palmarès des 10 pays les plus peuplés. Une approche basée sur la récupération des H&G dans les eaux usées cible les mêmes pays.

Cependant, un essai complet pourrait être dédié à l’analyse économique de la Chine afin de cibler plus précisément dans quelles provinces il serait favorable d’implanter des usines de biodiésel.

7.5 Présentation suggérée

Ainsi, le nouveau modèle développé dans ce chapitre reprend le schéma de départ de la symbiose industrielle de la Figure 1.2 et y ajoute les acteurs nécessaires à la production de biodiésel. La Figure 7.4 propose la forme de symbiose qui résulte de ce modèle proposé à Varennes.

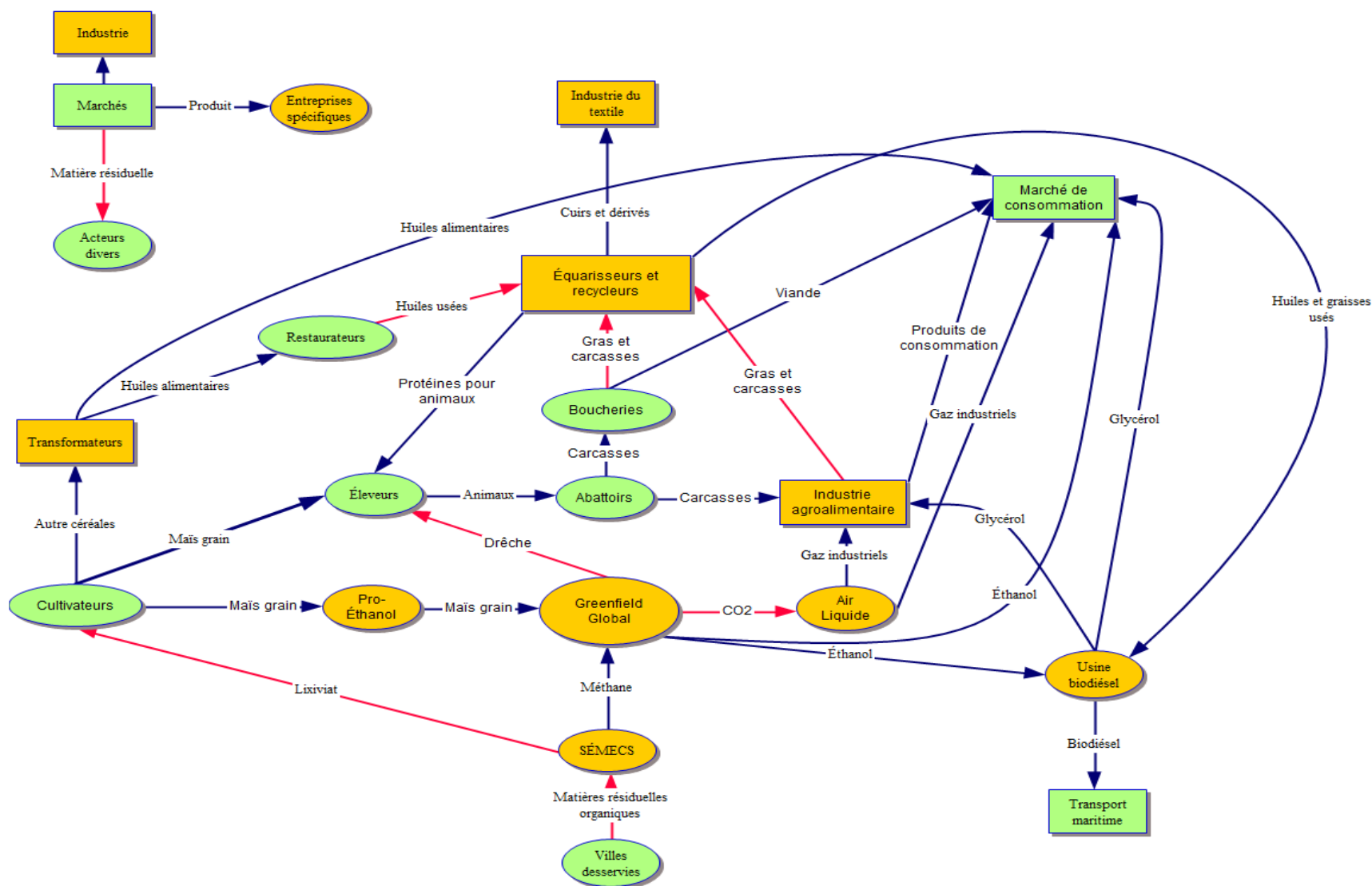


Figure 7.4 : Symbiose industrielle proposée qui intègre la production de biodiésel aux installations de Varennes

8. ANALYSE DE L'ÉTHYLÈNE

Il est possible de faire du biodiésel à partir de l'éthanol, mais qu'en est-il de la production d'éthylène? Est-ce plus ou moins rentable? Est-ce que ce modèle est exportable dans des régions similaires ou différentes de celles mentionnées à la section 7.4? C'est l'angle d'attaque de ce chapitre.

8.1 Technoéconomique

La revue de littérature sur la transformation vers l'éthylène et l'évaluation technoéconomique de Mohsenzadeh et al., (2017) n'aborde qu'une partie des points apportés au chapitre 6.2. En fait, elles s'attaquent surtout aux conséquences économiques d'une simulation réalisée à partir d'un choix technologique pas entièrement justifié. Oui, les choix de l'étude se tiennent, mais ils ne sont pas justifiés par les auteurs. Cependant, leurs conclusions sont solides. De plus, leur étude de cas serait du même ordre de grandeur que la production d'éthanol de Greenfield à Varennes, si la totalité de la production était destinée à produire de l'éthylène carboneutre.

8.1.1 Faisabilité technique

Pour un projet détaillé de mise en place d'une synergie complémentaire de symbiose industrielle, c'est à cette phase qu'une liste détaillée des intrants et extrants de chaque étape du procédé serait dressée. L'analyse serait d'ordre quantitatif. Or, compte tenu de la non-disponibilité de certaines informations précises et cruciales (comme la quantité de gaz naturel consommée par l'usine de Greenfield), il faut se limiter à une analyse qualitative pour cet essai.

- **Qualitatif**

Greenfield est la seule usine au Québec à produire de l'éthanol de grade carburant. C'est un alcool dénaturé dont toute trace d'eau est retirée et qui est rendu impropre à la consommation. De l'éthanol pur est donc disponible pour le procédé. Greenfield est en mesure de produire une certaine quantité de méthane, à partir de son propre procédé de traitement et le revalorise en l'utilisant pour créer de la vapeur. L'usine de la SÉMECS est déjà en mesure de générer, de purifier son biogaz et d'alimenter la distillerie. Le catalyseur suggéré par l'étude de Mohsenzadeh et al. est produit depuis 1980 et a donc près de 40 ans de lissage. L'eau utilisée par le procédé est recyclée et circule en boucle fermée. L'eau produite par la déshydratation de l'éthanol et séparée de l'éthylène pourrait être récupérée et transformée en vapeur. Cependant, la littérature ne mentionne pas le niveau de contamination lorsqu'elle est condensée à cette étape. Le CO₂ éliminé est transformé en CaCO₃ pur et il est vendu localement à prix intéressant. Il

peut aussi être utilisé au sol comme chaux agricole pour rehausser le pH. De l'hydroxyde de calcium doit être acheté pour faire la régénération du NaOH.

- Technique

Sur un plan technique, la production d'éthylène biosourcé est réalisable. D'ailleurs, Braskem en produit déjà 200 000 tonnes par année. La technologie est suffisamment mature pour être implantée. Cependant, plusieurs bémols sont à prendre en compte pour cette production en contexte québécois.

Premièrement, les impuretés retirées à l'étape de purification de l'éthylène correspondent à près de 1 % du bilan massique à la sortie des réacteurs. Elles peuvent être valorisées énergétiquement. Il est aussi possible que l'usine d'Air Liquide de Varennes soit en mesure de raffiner la fraction légère. Cependant, la fraction lourde comporte des molécules qui ne font pas partie des services offerts par Air Liquide, soit le diéthyle éther et l'acétaldéhyde (Air Liquide, 2019a et 2019b).

Deuxièmement, il faut maintenir les réacteurs autour de 425°C. Les hivers brésiliens et québécois étant différents, il est raisonnable de supposer que le coût énergétique pour le chauffage du procédé québécois sera plus élevé. D'ailleurs, en Amérique du Nord, les investissements récents pour faire le vapocraquage de l'éthane vers l'éthylène sont surtout situés près du golfe du Mexique (Texas et Louisiane) (Lewandowski, 2016).

Troisièmement, la déshydratation de l'éthanol est énergivore. La production d'un gramme d'éthylène demande, au minimum, un investissement énergétique de 1 632 joules (Morshbacker, 2009). La faisabilité n'est pas un problème, cependant la consommation d'énergie pour fabriquer 170 000 tonnes d'éthylène par an est énorme. Le sujet est abordé au point suivant.

- Quantitatif

En termes quantitatifs, les flux les plus importants sont ceux de matières premières et d'énergies. Les intrants matériaux n'offrent aucune difficulté particulière. La logistique routière serait à surveiller puisque le parc industriel, en plus des activités présentes, verra nécessairement un accroissement de l'achalandage des infrastructures routières vers les installations d'Energem et de la SÉMECS, notamment avec l'ajout de la desserte de collecte des matières organiques des 250 000 résidents de la ville de Longueuil (Lévesque, 2019, 30 janvier).

Le plus grand enjeu du projet est sa demande énergétique et surtout l'ordre de grandeur différent de la production d'énergie de la SÉMECS dans ses installations actuelles. Les calculs des tableaux 8.1 et 8.2 établissent l'ordre de grandeur soulevé.

Premièrement, la quantité d'énergie produite par la SÉMECS est importante. Ici, le volume de méthane produit sur une base annuelle a été converti en nombre de moles selon l'approximation d'un gaz parfait ($PV=nRT$).

Tableau 8.1 : Énergie potentielle de la SÉMECS pour une population de 250 000 habitants

Variable	Valeur	
Volume de méthane annuel	3 250 000	m ³
Énergie de combustion	50	kJ/g
Masse molaire méthane	16	g/mol
Masse annuelle méthane	8 293 579	g
Énergie équivalente	4,15E+11	J

Ce calcul repose sur une production de méthane issue de la desserte des MRC originales et ne comprend pas les quantités supplémentaires de la ville de Longueuil. Il serait raisonnable de doubler le résultat final de l'énergie produite par la SÉMECS sur une base annuelle (grossièrement 250 000 versus 500 000 habitants). Ensuite, ce nombre est comparé à la quantité d'énergie requise pour transformer la totalité de la production anticipée d'éthanol suite à l'installation d'Enerkem (3 000 000 millions de litres au total).

Afin de déterminer une base de calcul pour un projet d'envergure à Varennes, la quantité d'éthanol utilisée par Braskem est comparée à celle anticipée par Greenfield Global (Chemicals technology, s. d.).

Tableau 8.2 : Énergie nécessaire pour déshydrater l'éthanol en éthylène

Variable	Valeur	
Production éthylène Braskem	200 000	tonnes
Éthanol consommé Braskem	462 000 000	L
Éthanol anticipé Varennes	300 000 000	L
Différence entre Braskem et Varennes	65 %	
Tonnage annuel	129 870	tonnes
Masse annuelle	1,30E+11	g
Enthalpie de réaction	1 632	J/g
Énergie de chauffage nécessaire	2,12E+14	J

Ainsi, la seule production actuelle de la SÉMECS serait en mesure de répondre à 0,20 % des besoins énergétiques d'une usine d'éthylène transformant tout l'éthanol produit à Varennes. Il faut donc une source supplémentaire importante d'énergie pour combler ce vide énergétique. Alors, comment fait Braskem pour produire son éthylène « vert » et carboneutre? Serait-ce qu'elle utilise une partie de sa production d'éthanol pour combler ses besoins énergétiques? C'est ce qu'elle semble faire à son usine de

bioéthylène à Triunfo, Brésil. En effet, la compagnie transporte annuellement 570 000 000 L d'éthanol en direction de son usine, mais ne consomme que 462 000 000 L d'éthanol pour ses procédés. Les écrits recensés ne précisent pas ce qui explique la différence entre l'éthanol entrant et celui qui est transformé, mais il est permis de penser que la différence est valorisée pour des raisons énergétiques (Chemicals technology, s. d.). Partant de ce principe, la quantité d'éthanol à valoriser pour fournir les $2,12 \times 10^{14}$ joules nécessaires à la transformation des 129 000 tonnes hypothétiques est de 9 000 000 litres d'éthanol. Puisque l'idée initiale est de produire un éthylène biosourcé et carboneutre, il est intéressant de faire l'analyse de la sensibilité économique d'une production industrielle en n'utilisant aucune énergie fossile.

8.1.2 Sensibilité économique

Tant que la polymérisation de l'éthylène sera mise en œuvre, il y aura une demande considérable pour de l'éthylène de qualité. Justement, le marché des matières plastiques est en pleine réorganisation et réclame des monomères biosourcés pour s'affranchir des monomères d'origine pétrolière, notamment pour la production des polyéthylènes et des téréphtalates de polyéthylène (Olivier, 2019).

Le secteur pétrochimique montréalais utilise une chaîne courte de logistique orientée autour de la transformation du xylène en polyester qui a besoin d'éthylène glycol et donc d'éthylène (Société de développement économique Rivière-des-Prairies Pointe-aux-Trembles Montréal-Est, 2011).

xylène → paraxylène → acide téréphtalique → polyéthylène téréphtalate (PET)

Cependant, la seule production de 130 000 tonnes d'éthylène ne saurait répondre à la demande montréalaise. En effet, Selenis Canada, à elle seule, produit 144 000 tonnes de PET (Selenis Canada, 2019). La stabilité de la demande est plus difficile à évaluer pour le marché montréalais spécifiquement. Il est certain toutefois, tel que mentionné au chapitre 5.1, que la production d'éthylène dans le monde est croissante.

Dans l'analyse de sensibilité, les calculs effectués répondent à la question : est-il plus rentable de vendre de l'éthanol au prix courant ou d'en valoriser une partie pour combler les besoins énergétiques de la réaction de déshydratation et vendre l'éthylène? Ces calculs ont été effectués pour des portions d'éthanol valorisées de 3 %, 5 %, 10 %, 15 % et 20 %. Les régressions linéaires obtenues permettent de tracer la Figure 8.1.

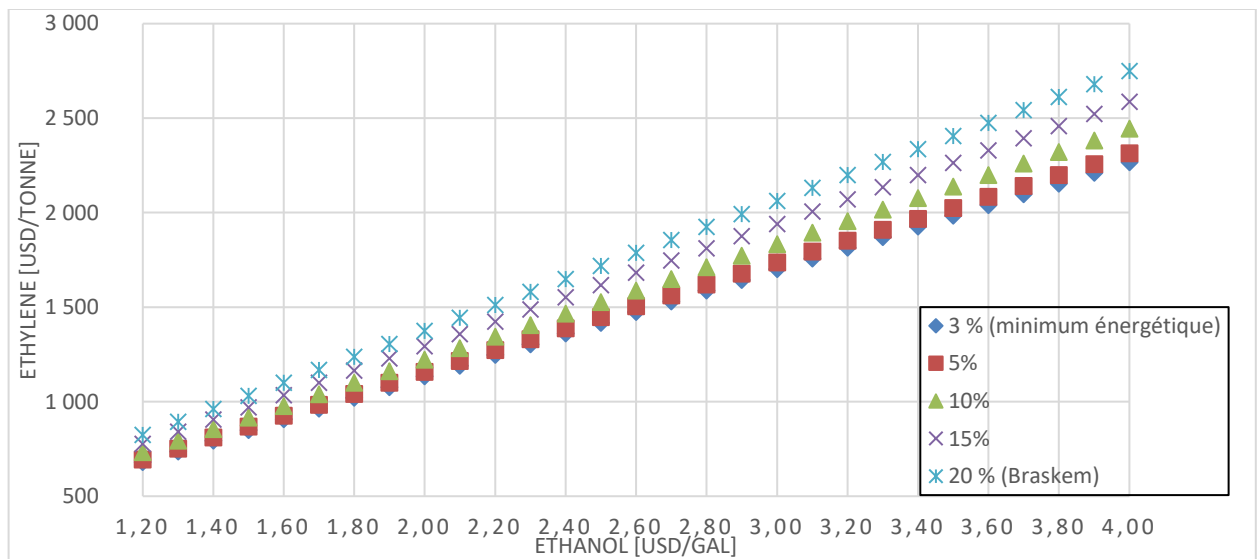


Figure 8.1 : Seuil de rentabilité de l'éthylène en fonction du prix de l'éthanol et de la portion de production en valorisation énergétique

Y a-t-il déjà eu une période où le prix de l'éthylène était supérieur à celui de la Figure 8.1 pour un prix d'éthanol donné? L'historique des prix de l'éthylène et de l'éthanol, depuis 2007, montre que de telles conjonctures se sont déjà produites, du moins pour le scénario de valorisation énergétique où 3 % de la production d'éthanol comble la demande énergétique de l'usine d'éthylène (The pH Report, 2018) (Markets Insider, 2019).

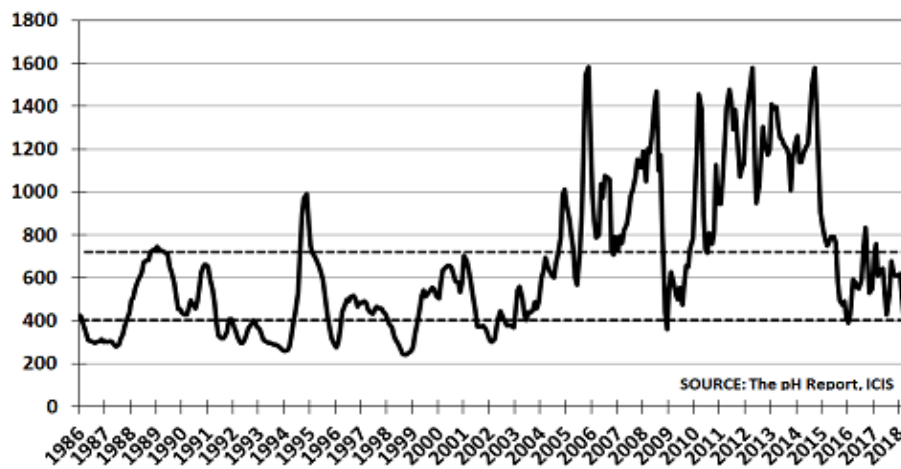


Figure 8.2 : Prix de l'éthylène en USD/t entre 1986 et 2018 aux États-Unis (tiré de The pH Report, 2018)



Figure 8.3 : Prix de l'éthanol entre 2007 et 2019 aux États-Unis (USD/GAL) (tiré de Markets Insider, 2019, 22 juillet)

Les figures 8.2 et 8.3 montrent deux choses. Premièrement, depuis 2005, les prix de l'éthylène fluctuent davantage qu'auparavant. Deuxièmement, les fluctuations de la valeur de l'éthylène suivent de près celles de l'éthanol. Cette affirmation est mise en évidence à la Figure C.3 de l'annexe 3 par la superposition des figures 8.2 et 8.3. Une différence de prix favorisant la production d'éthylène plutôt que la vente d'éthanol pourrait se produire à nouveau. Toutefois, à considérer les récents investissements majeurs pour produire de l'éthylène fossile, il ne semble pas que ce futur soit si près (Lewandowski, 2016). Par contre, la demande croissante pour de l'éthylène carboneutre pourrait créer une valeur ajoutée différenciée sur les marchés.

Mohsenzadeh et al. ont estimé les investissements nécessaires pour la construction et l'opération d'une nouvelle usine d'éthylène biosourcée. Le facteur faisant le plus varier les coûts liés au projet sont ceux liés à la quantité d'éthylène stocké sur le site. Un projet prévoyant un stockage de 2 heures de production et coûtant 47 000 000 USD explose à 184 000 000 USD pour un stockage de 48 heures. Cela a aussi des répercussions sur le coût d'entretien qui passe de 520 000 à 3 500 000 USD selon l'option de stockage choisie (Mohsenzadeh et al. 2017).

À la lumière de l'analyse économique, un projet d'éthylène biosourcé qui complète la symbiose de la distillerie d'éthanol Greenfield ne serait probablement pas rentable en s'arrêtant uniquement à la production d'éthylène. C'est là où la symbiose industrielle devient intéressante. Elle favorise des chaînes logistiques sur de plus petites distances et permet de diminuer les coûts d'inventaires et de transports. Deux hypothèses viennent changer le contexte de rentabilité et possiblement faire fi des prix

désavantageux de la matière première. La première consiste à relier une usine d'éthylène carboneutre de la rive sud de Montréal au parc chimique de l'est de l'île par gazoduc. Plusieurs conduites traversent déjà sous le fleuve pour relier les deux secteurs (Les Affaires, 2008, 14 février). La seconde option serait de construire une usine transformant l'éthylène carboneutre sur place.

Globalement, l'approche proposée revitalise la zone industrielle portuaire de Varennes en utilisant un intrant carboneutre. Sans que le nom ait existé par le passé, le parc industriel de Varennes fonctionnait partiellement en symbiose industrielle (Sommet de Montréal, 2002). Son évolution illustre aussi la grande faiblesse de la SI lorsqu'un domino principal tombe; tout l'écosystème industriel est ébranlé. Le parc dans sa forme actuelle est moribond depuis le choc économique de 2008 (Arcand, 2007, 16 octobre).

8.2 Environnemental

À l'instar de ce qui a été développé au chapitre 7.2, il est nécessaire dans le cas présent de construire de nouvelles installations dans le parc industriel de Varennes. L'autre alternative serait de relier par pipeline le parc chimique de l'Est de Montréal à celui de Varennes. Ici aussi, il est question d'utiliser et de transformer 100 % de la production d'éthanol de Greenfield Global en éthylène carboneutre. L'analyse environnementale de l'éthylène biosourcé vise donc les impacts du remplacement de l'éthylène d'origine fossile par son homologue « vert ».

8.2.1 Caractéristiques physiques de l'environnement

La construction de nouvelles installations, que ce soit pour un agrandissement de l'usine d'éthanol, une nouvelle usine de *Syngas* pour Enkema ou une usine d'éthylène, n'entraîne pas d'impact environnemental majeur sur l'utilisation du territoire. Un parc chimique d'une certaine importance a déjà existé au même endroit. Le remplacement d'éthylène fossile par un d'origine renouvelable ne change pas directement grand-chose. Peu importe l'origine, l'éthylène reste de l'éthylène. La seule différence pourrait provenir des impuretés présentes. Il est donc plus équitable de comparer le changement dans le précurseur de l'éthylène, soit la différence entre prendre de l'éthanol ou de l'éthane pour en produire. Les effets sur les composantes physiques de l'environnement sont donc ceux liés à l'agriculture intensive ou à la fracturation hydraulique.

8.2.2 Caractéristiques du vivant

Il s'agit du même territoire analysé qu'en 7.2.1, les conclusions liées à ce sujet sont donc les mêmes ici aussi. D'une part, les photos satellites montrent que les terrains sont retournés en friches industrielles envahies par la végétation. Ils attendent un nouveau développement. Les impacts sur la faune et la flore

locale sont considérés mineurs. Reste qu'avant toute nouvelle installation, un inventaire de terrain devrait quand même documenter la présence d'espèces à statut particulier. D'une autre part, ce n'est pas le produit comme tel qui risque d'avoir un impact sur la faune et la flore, mais bien le système l'entourant. La fin de vie des différents plastiques est un exemple aux impacts non négligeables.

De plus, les mesures mises en place au fil des ans améliorent les capacités de traitement des flux sortants des usines (Saint-Laurent Vision 2000, 1996). En ce qui a trait aux impacts environnementaux de la production d'éthylène, le bénéfice majeur en est l'importance de son caractère carboneutre comparé à son homologue fossile.

8.2.3 Pérennité ou résilience du modèle

Tout un pan traditionnel de l'industrie du plastique et de la chimie de synthèse dépend du carbone d'origine fossile. Malgré les efforts déployés en recherche dans la chimie verte, la réponse renouvelable de l'industrie tarde à se faire pour glisser vers un monde postpétrole. Selon l'*American Chemistry Society* (ACS), à ce jour plus de 98 % des produits chimiques organiques sont toujours dérivés du pétrole (ACS, 2019).

La fabrication d'éthylène renouvelable par la transformation de l'éthanol peut répondre à une partie de la demande. Cependant, en reprenant les calculs effectués pour la production de Braskem, tout l'éthanol du monde ne servirait qu'à produire 42 millions de tonnes d'éthylène. En 2016, la consommation mondiale d'éthylène était près de 150 millions de tonnes (Lewandoski, 2016). Ainsi, le modèle suggéré, dans son état actuel, ne saurait être universalisé afin de répondre à la demande mondiale actuelle d'éthylène. Par contre, il offre une opportunité de production locale d'un monomère important de la chimie de synthèse et du plastique. La chaîne d'agroraffinerie offre donc une opportunité de diversification de l'économie locale pour toute région agricole capable de produire de l'éthanol en plus de réduire la dépendance au gaz naturel fossile.

Dans le cas de Varennes, à l'exception des catalyseurs spécialisés, la majorité des matériaux nécessaires peuvent être produits localement. Par exemple, la construction peut utiliser l'acier recyclé localement par ArcelorMittal ou des métaux neufs produits par Rio Tinto fer et titane. La production d'éthanol se fait déjà à partir de maïs québécois et l'énergie nécessaire au séchage du grain est tirée du biométhaniseur local qui allonge la vie utile de résidus d'ici.

Ce réseautage local d'entreprises permettant l'implantation et l'exploitation de ce type d'industries offre une perspective intéressante sur l'exportation d'un modèle résilient de symbiose industrielle.

8.3 Sociétal

Un public peu informé pourrait percevoir d'un mauvais œil la venue d'une nouvelle usine de polyéthylène, malgré son caractère vert. D'une certaine façon, le scepticisme et le cynisme découlent de nos excès passés avec les plastiques jetables. Les ratés actuels de l'industrie du recyclage sont des arguments soulignés (Bergman, 2018, 21 septembre). Le Québec doit produire des plastiques biosourcés pour fabriquer des objets durables, mais il doit aussi moderniser ses centres de tri et développer les industries de recyclage qui réinjectent les matières secondaires selon des circuits courts sur le territoire.

Avant tout, la construction de nouvelles usines entre en opposition au mouvement de décroissance industrielle abordé en introduction. Cependant il s'agit de deux sujets différents où la résolution d'un dossier n'empêche pas de progresser dans l'autre. La diminution des GES ne passe pas par l'arrêt des activités industrielles, mais par l'arrêt de celles qui utilisent des matériaux organiques fossiles. La transition énergétique et la diminution des GES passent plutôt par des stades intermédiaires de développement de nouvelles productions carboneutres, par la production d'énergies vertes et l'utilisation des principes de chimie et d'ingénierie vertes.

8.4 Exportabilité du modèle

Les matières premières utilisées et produites dictent la nature des flux substitués ou mutualisés. Dans la symbiose déjà en cours à Varennes, l'installation produit l'éthanol biosourcé requis par la Politique québécoise de l'énergie comme additif dans l'essence légère. Cela se traduit par une nécessité d'implanter une distillerie en région rurale, près des producteurs de maïs-grain associés au projet par un club agroenvironnemental (Oliver, 2019).

Ensuite, la régénération de l'hydroxyde de sodium nécessite de l'hydroxyde de calcium. Cela produit un précipité de carbonate de calcium qui peut être utilisé dans les hauts-fourneaux. C'est la calcination du CaCO_3 dans les usines de concentration du fer qui attire toutes les impuretés contenues dans le minerai vers la surface et laisse un métal pur. Les usines de coulage du fer peuvent donc substituer le calcaire provenant directement des carrières (si leur technologie le permet) par de la chaux qui a déjà fait un cycle de vie complet. Sinon, le précipité peut aussi être retourné dans une cimenterie afin de recommencer la boucle et être énergétiquement neutre, tel que proposé à la Figure 8.6. Les deux prochaines figures montrent qu'il existe des endroits dans le monde où ces conditions sont remplies.

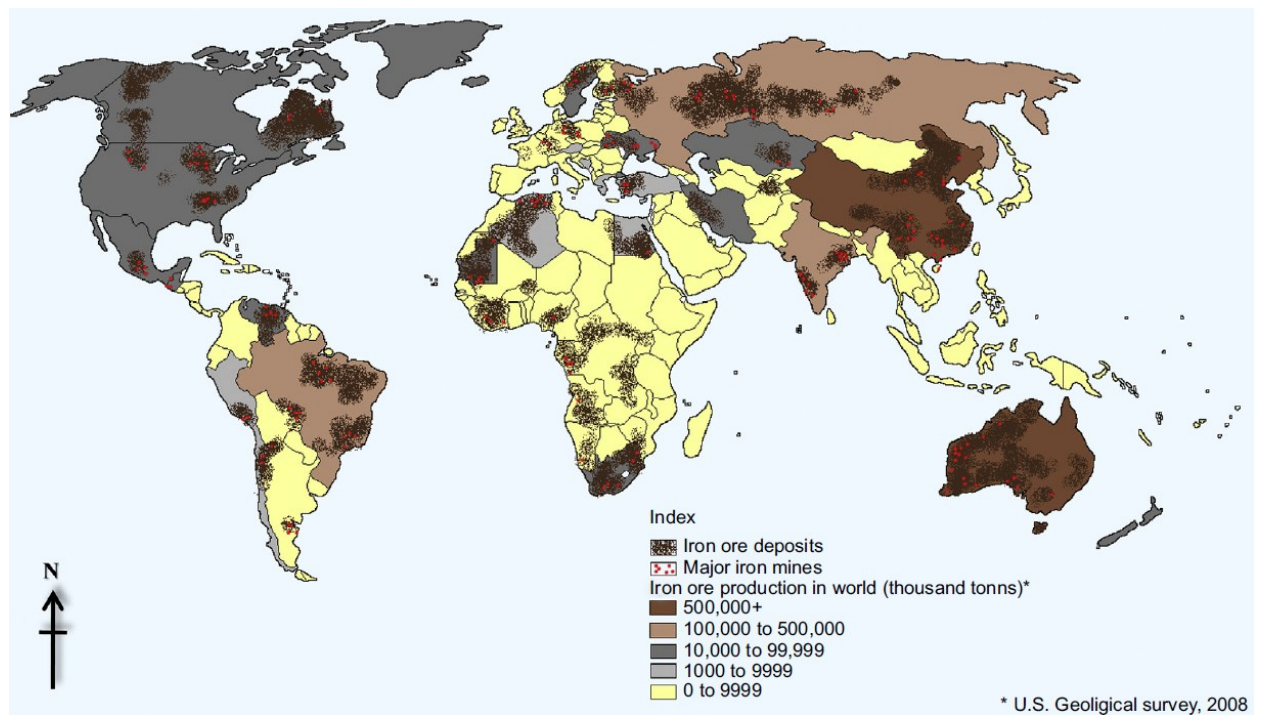


Figure 8.4 : Localisation des dépôts et mines de fer à travers le monde (tiré de Banerjee, Goswami et Mukherjee, 2018)

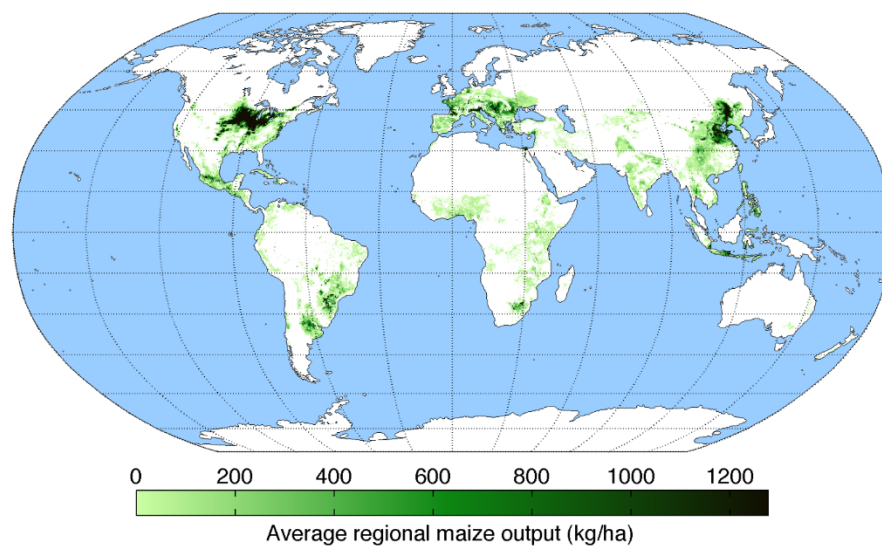


Figure 8.5 : Localisation de la production de maïs à travers le monde en 2000 (kg par hectare) (compilé par l'Institut d'Environnement de l'Université du Minnesota, depuis Monfreda, Ramankutty, et Foley, 2008)

9. ÉVALUATION ET ATTRIBUTION DES COTES

Chacune des hypothèses d'allongement de la symbiose de Varennes est analysée aux chapitres précédents. Elles sont évaluées selon les critères développés au chapitre 6. Considérant l'aspect carboneutre des deux scénarios, l'impact sur les changements climatiques n'est pas évalué puisque dans les deux cas il s'agit de remplacer un procédé « fossile ».

9.1 Évaluation du biodiésel

Sur un point de vue technoéconomique, il est possible de faire du biodiésel à partir d'éthanol, mais un inconvénient majeur subsiste. Le marché des huiles et graisses usées est saturé et il est difficile d'ajouter une nouvelle avenue à la matière première. Deux solutions existent. La première serait de faire la transition de toutes les raffineries utilisant du méthanol pour le remplacer par de l'éthanol. La seconde serait de trouver une nouvelle source d'H&G à travers les eaux usées de grands bassins de population et d'y créer une usine intégrée de traitement des eaux produisant du biodiésel. La pondération des sous-critères technoéconomiques donne 0,67.

Sur un plan environnemental, le biodiésel ne comporte que des avantages par rapport à son homologue fossile. Toutefois, il ne change pas le paradigme dans lequel s'inscrit le transport maritime. Les impacts sur la faune et la flore sont liés aux technologies motrices. Sur cet aspect, le biodiésel n'est donc ni mieux, ni pire que le diésel minéral. De plus, il ne s'agit que d'une réponse parmi tant d'autres pour l'industrie du transport maritime. L'avenir du biodiésel, qu'il soit de première, deuxième ou énième génération est trop incertain pour déterminer si le modèle durera sur le long terme. La pondération des sous-critères environnementaux donne 1.

Pour le pan sociétal, bien que les avantages soient modestes, aucun inconvénient particulier n'a été noté. Il est important de rappeler qu'à l'exception du maïs ou de la canne à sucre pour faire de l'éthanol, il n'est pas question d'employer de la matière organique de première génération pour l'évaluation des modèles. C'est pourquoi une cote de 1 est donnée.

Le modèle est jugé exportable à plusieurs endroits dans le monde, notamment en périphérie de grands centres urbains et en milieux ruraux où coexistent l'industrie de la production de viande animale et les plantations de maïs et cannes à sucre. C'est pourquoi ce critère est coté 2.

9.2 Évaluation de l'éthylène biosourcé

L'aspect technoéconomique montre que la faisabilité est difficilement au rendez-vous. Bien qu'en théorie la qualité des intrants et des produits est plus que suffisante, d'un point de vue technique, le climat

québécois est moins attrayant pour un procédé aussi énergivore. D'ailleurs, la SÉMECS, même en desservant 500 000 habitants, n'est pas en mesure de combler la demande énergétique pour la fabrication de l'éthylène. Pour faire cette transformation, il serait possible, dans un scénario parfait, de valoriser au minimum 3 % de l'éthanol produit afin de combler le vide énergétique sans avoir recours aux énergies fossiles. Pour ce faire et être rentable, l'éthanol produit doit être moins dispendieux que le prix de vente de l'éthylène. Les prix de vente de l'éthylène nécessaire à cette avenue ont rarement été atteints dans le passé. Il est donc improbable que ce modèle soit viable. C'est pourquoi la pondération de l'aspect technoeconomique est négative à -0,33. Dans un contexte québécois, ce projet ne devrait pas voir le jour.

D'un point de vue environnemental, l'éthylène biosourcé n'a pas grand impact direct sur les composantes physiques de l'environnement à l'exception d'une diminution de la production de GES. Il en va de même pour la composante du vivant. À l'instar du biodiésel, c'est le paradigme dans lequel l'éthylène s'inscrit qui impacte le vivant. Cependant, l'origine biosourcée de l'éthylène est considérable puisqu'il s'agit d'un précurseur important pour une multitude de produits plastiques pétrochimiques. Dans un monde sans pétrole, il serait toujours possible d'utiliser ses produits dérivés. De plus, la presque totalité des produits sortants d'une usine du genre peut être utilisée sur un circuit court et augmenter la possibilité de mutualisation et de substitution de flux. La pondération de l'éthylène biosourcé pour la sphère environnementale est de 0,67.

L'arrêt d'utilisation de matériaux fossiles permet de maintenir la qualité de vie procurée par les dérivés de l'éthylène tout en s'approchant des cibles de réduction de GES. Cet élément est évalué à 2.

Le modèle est jugé exportable à plusieurs endroits dans le monde, notamment en milieux ruraux capables de produire de l'éthanol, près de carrières et de concentrateurs de fer. C'est pourquoi ce critère est coté 2.

L'évaluation ainsi complétée est rapportée au Tableau 9.1. La production d'ester d'éthyle d'acide gras semble une meilleure avenue que la production d'éthylène biosourcé. Les scénarios ont été évalués selon un contexte québécois. Des conditions différentes pourraient amener à une évaluation différente.

Tableau 9.1 : Évaluation des modèles de symbioses industrielles analysés selon leurs aspects

	Biodiésel	Éthylène
Technoéconomique	0,67	-0,33
<i>Faisabilité technique</i>	0,33	0,33
Qualitatif	2	2
Technique	1	0
Quantitatif	-2	-1
<i>Sensibilité économique</i>	1	-1
Environnemental	1,00	0,67
Caractéristiques physiques de l'environnement	2	0
Caractéristiques du vivant	0	0
Pérennité	1	2
Sous-Moyenne	0,83	0,17
Sociétal	1	2
Exportabilité du modèle	2	2
Moyenne totale	1,17	1,08

10. LIMITES DE L'ESSAI

La présente étude comporte plusieurs limites et quelques faiblesses. Cette section se veut une réflexion sur le travail réalisé et les améliorations qui pourraient lui être apporté dans le cadre d'études plus poussées ou encore pour une revisite du sujet dans quelques années.

10.1 Collaboration partielle des acteurs

Plusieurs acteurs œuvrant dans les milieux abordés par les différentes thématiques de l'essai ont été contactés. Certains ont été emballés par le projet et se sont montrés plus que coopératifs pour la collecte d'informations, l'aiguillage et l'approfondissement du sujet. D'autres se sont montrés réticents et plusieurs ont simplement ignoré les différents courriels et appels téléphoniques. Un organisme reconnu reprenant la quête d'informations dans un contexte officiel obtiendrait des informations détaillées permettant de pousser l'étude plus loin sur l'aspect technique.

10.2 Les projections et le peut-être

Cet essai est avant tout une spéculation sur des besoins anticipés de changements de procédés. Ce n'est pas demain que l'entreprise Greenfield Global changera son modèle d'affaires et deviendra transformateur d'éthanol. Pourtant, l'exercice intellectuel se base sur un modèle où 100 % de la production d'éthanol de Varennes est transformé en un produit à plus grande valeur ajoutée. De plus, la façon dont l'éthanol est obtenu par production de première génération n'est pas critiquée. Ce n'est pas le but du travail, ça sort du spectre de la symbiose industrielle et d'autres se sont prononcés sur le sujet par le passé. Mohamed Mehdi Kacimi a analysé le secteur de l'éthanol selon les principes du développement durable (Kacimi, 2008). Bien que le sujet ait évolué depuis, la lecture de Kacimi permet de répondre aux questions en lien avec la production d'éthanol de première génération.

10.3 Réponse à des enjeux

L'essai offre une réponse aux différents enjeux posés par la transition énergétique. Que serait-il possible de faire avec l'éthanol, présentement utilisé comme additif à essence, dans un Québec qui n'utilise plus le moteur à combustion pour ses transports routiers? Sous-jacent à cette question en découlent d'autres. Quel est le cycle de vie de l'éthanol? Quels sont les ordres de grandeur d'énergies impliquées? L'humain est-il en mesure de répondre à ses besoins énergétiques en s'affranchissant des énergies fossiles? Les réflexions de cet essai apportent une lueur d'espoir en débrouillant les avenues possibles de transformation de l'éthanol carboneutre et en proposant une solution énergétique à la gestion des matières résiduelles des industries agroalimentaires.

10.4 Retour sur la méthodologie

La grille d'analyse multicritère est un outil fréquemment utilisé dans les travaux remis au Centre universitaire de formation en environnement (CUFE). La méthode d'analyse est simple et suffisamment flexible pour s'appliquer à une multitude de scénarios. Cependant, elle n'est pas sans défaut. Bien qu'à la base elle tente d'aiguiller la prise d'une décision de manière objective, elle est néanmoins susceptible aux biais de l'évaluateur dans la formulation des critères évalués et dans l'importance accordée à chacun d'eux. Ultiment, l'outil demande une appréciation subjective où le quantitatif sert avant tout à juger le qualitatif. À tout le moins, elle permet au lecteur de faire sa propre idée en suivant le raisonnement de l'auteur et en jugeant la pondération choisie par ce dernier.

Au final, puisqu'il s'agit d'anticiper la réorientation d'une industrie, une plus grande importance est accordée à l'analyse des aspects économiques et environnementaux des options qu'à ceux de la société. Ce choix est surtout dicté par la disponibilité de l'information. Il est difficile de prévoir les impacts sociaux d'un enjeu en absence de sondages dévoilant le puits de la population. C'est peut-être un biais dans la méthodologie, puisque les impacts sociaux de la production d'éthanol sont surtout en lien avec l'approvisionnement alimentaire, la menace de la monoculture et la perte de jouissance du droit de propriété par les populations les plus défavorisées (Kacimi, 2008). Ces pressions relèvent avant tout de la production d'éthanol de première génération, un enjeu hors du spectre de l'essai.

L'évaluation faite ici repose sur la faisabilité technique pour la seule installation de Varennes, mais l'exportabilité du modèle ouvre des perspectives intéressantes pour créer des îlots d'écologie industrielle ailleurs dans le monde. Ce serait une façon de créer des milliers de sites qui s'inspirent de Kalungborg.

Puisqu'ils ne peuvent être développés davantage en ce moment, si les critères sociaux et d'exportabilité sont enlevés, le scénario de production de biodiésel est nettement avantageux dans un contexte québécois.

10.5 Les changements climatiques dans tout ça?

Une précision importante doit être faite. Les impacts sur les changements climatiques ne sont pas évalués pour deux raisons. Premièrement, faire la différence entre les scénarios nécessite la réalisation d'analyses de cycle de vie, qui en soi peuvent être le sujet d'essais. Deuxièmement, considérant l'origine renouvelable et carboneutre de la biomasse utilisée chez Greenfield Global, la différence des émissions potentielles de CO₂ est jugée a priori trop petite pour réellement faire une différence dans l'évaluation de ce volet.

11. RECOMMANDATIONS

La nature de cet essai appelle trois recommandations ciblées vers autant d'acteurs. Une première est la remise en question du recyclage actuel des huiles et graisses animales de l'industrie agroalimentaire. La deuxième s'adresse à toutes les industries produisant l'éthanol carboneutre dans le monde. Une troisième recommandation s'adresse au gouvernement du Québec. Ces recommandations mettent la table pour une meilleure implantation et une meilleure pérennité de la symbiose industrielle au Québec et de la ZIP Varennes-Contrecoeur.

11.1 Recommandation à l'industrie agroalimentaire

Pour produire un biodiésel à forte valeur carboneutre, des informations complémentaires sont requises afin de développer les études technicoéconomiques fines pour cet écomatériau. Le secteur de l'industrie agroalimentaire doit :

Réaliser l'analyse de cycle de vie (ACV) comparative entre les additifs lipidiques destinés à l'alimentation des animaux d'élevage et la comparer à des formes nouvelles d'écomatériaux qui peuvent servir à la transition énergétique.

Plusieurs ACV sur différents biodiésels ont été développées, alors qu'aucune ne semble porter sur l'intégration des huiles et graisses alimentaires recyclées pour cette finalité. Bien qu'il semble rentable pour les éleveurs de procurer à leurs bêtes une source de calories à moindre coût en mélangeant des huiles et graisses alimentaires recyclées à la moulée, thermodynamiquement cette pratique ne tient pas la route. Dans un cas idéal où il n'y a pas de propagation de maladies, le cycle de vie normal d'un animal de rente est le suivant : Il est engraisé, puis abattu et dépecé, transformé et équarri, certaines composantes sont recyclées et retournent en début de cycle pour alimenter une nouvelle génération de bêtes. Chaque fois que la matière est transformée, des pertes se produisent dues à la non-idéalité des systèmes. Une pratique de gestion des matières résiduelles à envisager consisterait à transformer chez le recycleur (ou près de celui-ci) les H&G alimentaires à statut proche de la carboneutralité afin d'en soutirer l'énergie et de laisser la nature réinsérer le carbone nécessaire dans la chaîne alimentaire.

Les répercussions de ce nouveau modèle seraient multiples. Si toutes les matières résiduelles organiques issues du secteur de la fabrication de la viande étaient valorisées au lieu d'être traitées, au Québec seulement, ce sont 500 000 tonnes de matières riches en énergie qui pourraient fournir un travail moteur. Les pertes énergétiques liées à la transformation existeraient toujours, mais elles cesseraient d'être cycliques. Ainsi, l'énergie fournie par une tonne de suif cesserait de s'estomper à chaque itération de son

cycle de vie. Dans le cas de l'axe industrialo-portuaire Varennes-Contrecoeur, un pipeline reliant l'usine à un point de distribution majeur du carburant maritime diminuerait les besoins en transport routier ou ferroviaire. Ce sont donc, au moins, 500 000 tonnes de matières retirées des routes.

Ce scénario n'est pas sans contrecoup. À cheptel égal, il faut, nécessairement, transporter une plus grande quantité de grains vers les élevages. La pression sur la production de ces grains s'en voit accrue et peut même se traduire par une plus petite exportation à l'international de certaines céréales, sans compter qu'un plus grand besoin en transport serait induit. C'est pourquoi une analyse de cycle de vie comparative sur le sujet serait pertinente.

11.2 Recommandation à l'industrie de l'éthanol

Des multinationales occupent tout le secteur industriel de l'éthanol. La chute anticipée de la demande pour l'éthanol carboneutre annonce les perturbations à venir du commerce et du tissu social. L'industrie de l'éthanol doit diversifier sa clientèle, donc :

Réaliser les études de transformation qui misent sur le maintien de la carboneutralité durant les décennies de transition énergétique.

Présentement l'industrie nord-américaine est dépendante des obligations gouvernementales données aux raffineries pétrolières d'ajouter de l'éthanol à l'essence. Or, un avenir ancré dans la pérennité consiste à créer un produit que seule l'industrie de l'éthanol est en possibilité de produire : un diésel carboneutre, à faible teneur en soufre, qui a pour matière première des huiles et graisses alimentaires recyclées, qui termine de façon logique le cycle de vie de ces H&G et qui répond à un besoin criant de l'industrie du transport maritime.

Si les circonstances économiques le permettent, il est aussi possible de diversifier les produits dérivés de l'éthanol en prenant la voie de l'éthylène.

Cet essai démontre qu'il est possible, dans certains contextes, de configurer des distilleries pour devenir des usines cœurs dans des parcs écoindustriels intégrés à courtes chaînes logistiques. Il faut surtout adapter les modèles suggérés aux circonstances locales.

11.3 Recommandation au Gouvernement du Québec

L'État a la responsabilité de stimuler les transformations positives dans la société. Les ministères à vocation économique ainsi que le ministère de l'Environnement doivent :

Agir à titre de facilitateur pour la mise en place de parcs d'écologie industrielle, de symbioses industrielles régionales et de formes d'économie circulaire.

Tel que mentionné au chapitre 2.8, c'est avant tout la société civile et corporative qui œuvre à l'implantation de la symbiose industrielle. Planter la SI n'est pas une mince affaire. À défaut de répéter le contenu du Tableau 2.5, un nombre important d'étapes est nécessaire pour mettre en place une symbiose effective. Une grande quantité de ressources humaines est utilisée pour compléter ces étapes et une quantité non négligeable de temps est consacrée à élaborer les projets, faire les diagnostics territoriaux, recruter les participants et collecter les données pertinentes. Le gouvernement du Québec montre clairement, par l'établissement de son Plan d'action pour la croissance et les technologies propres, qu'il n'a pas l'intention de participer proactivement dans le processus. Cependant, c'est aussi lui, ou du moins, un de ses ministères, qui possède une grande quantité des informations de base nécessaires à la complétion du Tableau 2.5. Il s'agit du Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques via les informations et les données confidentielles contenues dans les permis et certificats d'autorisation. Les entreprises sont avares de partager leurs secrets industriels. Toutefois, le MELCC possède déjà les informations de base nécessaires à la SI. Elles pourraient être fournies à un comité de ciblage des symbioses industrielles sur différentes régions québécoises. Les informations nominatives dans les dossiers du MELCC sont confidentielles. Par contre, un groupe de fonctionnaires, tenu au secret professionnel, utilisant la vision régionale d'ensemble pourrait cibler des synergies potentielles et mettre en contact les différents acteurs concernés.

CONCLUSION

Chacun des modèles répond à des besoins différents et s'inscrit dans des contextes différents. La revue de la littérature révèle les ordres de grandeur industriels engagés. Les quantités d'énergies impliquées sont énormes. La production de biodiésel à partir d'éthanol ne pourra donc jamais répondre aux besoins énergétiques de tous les secteurs de transports. Par contre, l'essai démontre, qu'avec une conversion de la chaîne d'approvisionnement et advenant que les autres intrants nécessaires (H&G alimentaires, H&G provenant des eaux d'épurations municipales) soient au rendez-vous en quantité suffisante, que tout l'éthanol carboneutre du monde serait suffisant pour combler près de 100 % des besoins énergétiques du transport maritime international. En d'autres mots, une réinvention du cycle de vie des huiles et graisses alimentaires et une reconfiguration de l'industrie de l'alcool éthylique permettraient d'obtenir cet accomplissement en utilisant environ 90 % de l'éthanol mondial. Cette proportion n'est pas si loin des 80 % actuellement destinés au secteur énergétique. Ainsi, l'éthanol carboneutre pourrait être valorisé en carburant biodiésel alors que le 10 % restant pourrait être utilisé dans les autres secteurs comme celui de la chimie traditionnelle. Bien que des études plus poussées soient nécessaires pour le confirmer, un nouveau modèle de zone industrialo-portuaire pourrait ainsi voir le jour et offrir une alternative novatrice au vieil exemple de Kalundborg des années d'après-guerre.

Il y a de la place pour la nuance. Dans un contexte où l'utilisation de biodiésel n'est pas requise, il est tout de même possible de valoriser l'éthanol autrement qu'en le brûlant directement. Un parc chimique pourrait aussi réaliser un virage vert en produisant un éthylène carboneutre acheminé vers la production des plastiques biosourcés.

Dans le cas québécois et pour toutes les régions où l'industrie agroalimentaire est fortement présente, le biodiésel est une solution plus intéressante. D'ailleurs, la production mondiale d'éthanol ne peut répondre à la demande planétaire d'éthylène. C'est plutôt une réponse spécifique à des demandes plus locales ou à plus petite échelle. Cette option est à examiner dans le cas où il n'y a pas de gisement de proximité de matières résiduelles pour combiner l'éthanol avec d'autres molécules.

Ces options sont non négligeables. Le marché de l'éthanol, dépendant des obligations gouvernementales, reste fragile à un changement politique. Les producteurs d'éthanol peuvent renforcer leur position en développant les marchés alternatifs proposés. Ils ont aussi avantage à poursuivre les projets de symbiose industrielle entre eux, leurs fournisseurs et leurs clients. D'ailleurs, une production de première génération rend tous les marchés éthyliques vulnérables aux situations de crises alimentaires et à la montée des protestations écologiques, ils ont donc intérêt à diversifier leurs méthodes de production.

Dans le cas de Greenfield Global à Varennes, l'écosystème industriel en place est nettement à l'avantage de plusieurs acteurs locaux. Le développement d'une nouvelle filière issue de l'éthanol renouvelable peut renforcer cette symbiose en substituant et en mutualisant davantage de flux. Puisque la transition énergétique va se faire tôt ou tard, il est préférable de la préparer plutôt que de la subir.

Le gouvernement provincial a aussi un rôle à jouer dans cette transition. Il détermine la direction, influe sur la forme et le rythme. Il possède toute l'information sur les activités industrielles des territoires. C'est l'acteur le mieux placé pour initier les démarches de résilience des différents parcs industriels.

Dans un monde où la grogne environnementale monte et où la pression de la population se fait de plus en plus sentir, la mise en place d'une robuste symbiose industrielle montre un bon côté du capitalisme. Il sera jugé sur sa souplesse, sa capacité d'adaptation à mieux gérer les ressources et sur sa capacité à s'insérer dans la transition énergétique afin d'amortir les chocs d'une révolution de la décroissance.

RÉFÉRENCES

- Abraham, Y-M. (2018, 4 octobre). La décroissance, un scénario absolument inévitable. *Médium large*. Radio-Canada. Repéré à <https://ici.radio-canada.ca/premiere/emissions/medium-large/segments/panel/89533/festival-decroissance-bouchez-abraham-mongeau-lafontaine>
- Acros Organics. (s. d.). Material safety data sheet : Glycerol. Repéré à <https://westliberty.edu/health-and-safety/files/2012/08/Glycerol-Reagent-ACS.pdf>
- Adoue, C. (2007). *Mettre en oeuvre l'écologie industrielle*. Lausanne : Presses Polytechniques et universitaires romandes.
- Agriréseau. (2007). Le temps des biocarburants est-il venu? Repéré à https://www.agrireseau.net/bovinsboucherie/documents/Understanding_Biofuels_f.pdf
- Air Liquide. (2019a) Gaz industriel. Repéré à <https://industrie.airliquide.ca/gaz-industriels-0>
- Air Liquide. (2019b). Gaz spéciaux. Repéré à <https://industrie.airliquide.ca/gaz-speciaux>
- Al-Megren, H. et Xiao, T. (2016). Chapter 4 Production of Ethylene and its commercial importance in the global market : *Petrochemical catalyst, materials, processes and emerging technologies*. Hershey, PA, USA : IGI Global
- American chemistry society. (2019). Green chemistry history. Repéré à <https://www.acs.org/content/acs/en/greenchemistry/what-is-green-chemistry/history-of-green-chemistry.html>
- Anastopoulos, G., Zannikou, Y., Stournas, S., Kalligeros, S. (2009). Transesterification of vegetable oils with ethanol and characterization of the key fuel properties of ethyl esters. *Energies*, 2, 362-376.
- Arcand, D. (2007, 16 octobre). L'usine de Basell à Varennes ferme ses portes. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/affaires/economie/200901/06/01-680983-lusine-de-basell-a-varennes-ferme-ses-portes.php>
- Banerjee, R., Goswami, P., & Mukherjee, A. (2018). Stabilization of Iron Ore Mine Spoil Dump Sites With Vetiver System. *Bio-Geotechnologies for Mine Site Rehabilitation*, 393–413.
- Bergeron, P-O. (2016, 19 octobre). Vers l'interdiction des moteurs à essence sur l'île de Montréal? *Huffingtonpost*. Repéré à https://quebec.huffingtonpost.ca/pierre-olivier-bergeron/interdiction-moteurs-propulses-a-essence_b_12517092.html
- Bergman, S. (2018, 21 septembre). Everything you've been told about plastic is wrong – the answer isn't recycling. *The independent*. Repéré à <https://www.independent.co.uk/voices/plastic-waste-wish-recycling-bins-black-environment-green-shopping-a8548736.html>
- Berti, A. (2019). Could fuel cells soon be used in ship propulsion. Repéré à <https://www.ship-technology.com/features/hydrogen-ship-propulsion/>
- Bluebird-electric. (2015). Bunker fuel – Air pollution solution. Repéré à http://www.bluebird-electric.net/bunkers_fuel_coal_oil_diesel_energy.htm
- Bouman, E.A., Lindstad E., Rialland, A.I., Strømman, A.H. (2017). State-of-the-art technologies, measures and potential for reducing GHG emissions from shipping — a review. *Transportation research part D : Transport and environment*. 52(A), 408-421.

- Brandin, J., Hultberg, C., Nilsson, A.L. (2008). Bio-Propane from glycerol for biogas addition. Repéré à https://www.researchgate.net/publication/283725396_Bio-Propane_from_glycerol_for_biogas_addition
- Caillou, A. (2017, 25 novembre). Les Québécois, des consommateurs responsables? *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/societe/consommation/513970/societe-les-quebecois-des-consommateurs-responsables>
- Canola council of Canada. (2019). Current oil exports. Repéré à <https://www.canolacouncil.org/markets-stats/statistics/current-oil-exports/>
- Centre de transfert technologique en écologie industrielle (CTTÉI). (2013). *Création d'une symbiose industrielle*. Synergie Québec. Repéré à <http://www.synergiequebec.ca/wp-content/uploads/2017/04/cttei-fr.pdf>
- Chemicals technology. (s. d.) Braskem ethanol-to-ethylene plant. Repéré à <https://www.chemicals-technology.com/projects/braskem-ethanol/>
- Chertow, M. R. (2000). Industrial Symbiosis : Literature and Taxonomy. *Annual Review of Energy and the Environment*, 25, 313-337.
- Ciriminna, R., Pina, C.D., Rossi, M., Pagliaro, M. (2014). Understanding the glycerol market. *European journal of lipid science and technology*, 116, 1432-1439
- Commerce express. (2018). 5 Quick facts about semi-trucks. Repéré à <https://www.commerceexpressinc.com/news/view/5-quick-facts-about-semi-trucks>
- Concawe. (2017). *Marine fuel facts*. Repéré à https://www.concawe.eu/wp-content/uploads/2017/01/marine_factsheet_web.pdf
- Cornelissen, K. (2007, 20 juillet). Production d'éthanol par maïs-grain : Sommes-nous en train de rater la cible? *Gaïa Presse*. Repéré à <https://www.gaiapresse.ca/2007/07/production-dethanol-par-mais-grain-sommes-nous-en-train-de-rater-la-cible/>
- Cornell Chronicle. (2001). Ethanol fuel from corn faulted as 'unsustainable subsidized food burning' in analysis by Cornell scientist. Repéré à <http://news.cornell.edu/stories/2001/08/ethanol-corn-faulted-energy-waster-scientist-says>
- Dubuc, A. (2016, 2 novembre). Varennes change la vocation du parc pétrochimique. *La Presse*. Repéré à http://plus.lapresse.ca/screens/635ada59-4656-40f1-838e-0e17c42adcb___7C___0.html
- Dufreche, S., Hernandez, R., French, T., Sparks, D., Zappi, M., Alley, E. (2007). Extraction of lipids from municipal wastewater plant microorganisms for production of biodiesel. *Journal of the American oil chemists' society*, 84, 181-187.
- Dupaul, R. (2019, 25 mars). La fin du moteur à essence coutera cher à l'état. *Lapresse+*. Repéré à http://mi.lapresse.ca/screens/c94565e1-2da2-497d-a99b-f69d4b3cf88a___7C___0.html
- Économie et Innovation Québec. (2019). Stratégies et politiques : zones industrialo-portuaires. Repéré à <https://www.economie.gouv.qc.ca/bibliotheques/strategies/strategie-maritime-du-quebec-2015-2020/zones-industrialo-portuaires/>
- Encyclopaedia Britannica. (s. d.). Sludge treatment and disposal. Repéré à <https://www.britannica.com/technology/wastewater-treatment/Sludge-treatment-and-disposal>
- Enerkem. (2019). Projets et partenariats. Repréré à <https://enerkem.com/fr/usines/projects-partenariats/>

- Équiterre. (2018). Pourquoi l'électrification? Repéré à <https://equiterre.org/solution/pourquoi-lelectrification>
- Eramo, M. (s. d.). *Global ethylene market outlook : low cost feedstocks fuel the next wave of investments in North America and China*. Repéré à http://media.corporate-ir.net/media_files/IROL/11/110877/05_Global_Ethylene_Market_Outlook_Eramo.pdf
- Esseghaier, L. (2016). *Interrelation de l'écologie industrielle et de l'économie circulaire – étude du parc industriel et portuaire de Bécancour* (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec). Repéré à http://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/8201/Esseghaier_Linda_MEnv_2016.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Evans, G. (2007). *International biofuels strategy project : liquid transport biofuels – technology status report*. National non-food crops center. Repéré à http://www.globalbioenergy.org/uploads/media/0711_NNFCC_-_Liquid_Transport_Biofuels_Technology_Status_Report.pdf
- FM 103,3. (2019, 14 janvier). L'ouverture du Costco distribution à Varennes cause un bouchon de circulation. *FM 103,3*. Repéré à <http://www.fm1033.ca/louverture-costco-distribution-a-varennes-cause-bouchon-de-circulation/>
- Fondation Ellen MacArthur. (s. d.) Économie circulaire. Repéré à <https://www.ellenmacarthurfoundation.org/fr/economie-circulaire/ressources>
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2018). *OECD-FAO agricultural outlook 2018-2027*. Repéré à http://www.fao.org/3/i9166e/i9166e_Chapter3_Cereals.pdf
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2019). FAOSTAT –Live animals. Repéré à <http://www.fao.org/faostat/en/?#data/QA/visualize>
- Gouvernement du Québec. (2015). *Propulser le Québec par l'électricité : plan d'action en électrification des transports 2015-2020*. Repéré à https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/electrification/Documents/PAET.pdf
- Gouvernement du Québec. (2018). *Plan d'action pour la croissance et les technologies propres : vers une économie plus verte et prospère*. Repéré à https://www.economie.gouv.qc.ca/fileadmin/contenu/documents_soutien/secteur_activites/environnement/pactp_document_complet.pdf
- Greenfield Global. (2017). APCAS biogas et bioénergie : Projet de biométhanisation de la SÉMECS à Varennes. Repéré à <http://www.apcas.qc.ca/wp-content/uploads/2017/07/2017-biogaz-2.2.-Roberge-SEMECS.pdf>
- Guillemette, F. (19 avril 2019). Responsable environnement chez Rothsay, conversation téléphonique.
- Hébert, M. (2012). *Politique de recyclage et évaluation des émissions de GES*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/articles/boues-municipales-pol.pdf>
- Horseboating society. (2003). The horseboating society. Repéré à <http://www.horseboating.org.uk/>
- Indexmundi. (2019). Beef monthly price – US dollars per kilogram. Repéré à <https://www.indexmundi.com/commodities/?commodity=beef&months=12>

- International energy agency. (2018). *Key world energy statistics*. Repéré à <https://webstore.iea.org/key-world-energy-statistics-2018>
- International maritime organization. (2015). *Third IMO greenhouse gas study 2014 : executive summary and final report*. Repéré à <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Documents/Third%20Greenhouse%20Gas%20Study/GHG3%20Executive%20Summary%20and%20Report.pdf>
- International maritime organization. (2017) Low carbon shipping and air pollution control. Repéré à <http://www.imo.org/en/mediacentre/hottopics/ghg/pages/default.aspx>
- International maritime organization. (2019). Prevention of air pollution from ships. Repéré à <http://www.imo.org/en/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Air-Pollution.aspx>
- Jackson, T., Webster, R. (2016). Limits revisited : a review of the limits to growth debate. Repéré à <http://limits2growth.org.uk/revisited>
- Kacimi, M.M. (2008). *Analyse du secteur de l'éthanol selon les principes du développement durable* (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec) Repéré à https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/7250/Cufe_Kacimi_essai43.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Kalundborg Symbiosis. (2018). Explore the Kalundborg symbiose : carte interactive du site. Repéré à <http://www.symbiosis.dk/en/>
- Kirk-Othmer (1999) Concise encyclopedia of chemical technology : Hexane. (4^e). New York : John Wiley & Sons.
- Kochar, N.K., Merims, R., Padia, A.S. (1981). Ethylene from ethanol. *Chemical engineering progress*, 77(6), 66-70
- Koretsky, M. D. (2012) *Engineering and chemical thermodynamics* (2e). New York, NY, États-Unis : Wiley
- La Terre de chez nous. (2014, 2 septembre). Nouvelle filière d'éthanol agricole en vue au Québec. *La Terre de chez nous*. Repéré à <https://www.laterre.ca/actualites/environnement/nouvelle-filiere-dethanol-agricole-en-vue-au-quebec>
- Lane, J. (2010). What are – and who's making – 2G, 3G, and 4G biofuels? Repéré à <https://web.archive.org/web/20100521143237/http://www.biofuelsdigest.com/bdigest/2010/05/18/3g-4g-a-taxonomy-for-far-out-%E2%80%94-but-not-far-away-%E2%80%94-biofuels/>
- Lantz, L. (2018). Longer vehicle life expectancy : a testament to research and technology. The star. Repéré à <https://www.thestar.com/autos/opinion/2018/03/23/longer-vehicle-life-expectancy-a-testament-to-research-and-technology.html>
- Les Affaires. (2008, 14 février). Péromont : grand ménage écologique. *Les affaires*. Repéré à <https://www.lesaffaires.com/secteurs-d-activite/general/petromont--grand-menage-ecologique/525782>
- Lévesque, K. (2019, 30 janvier). Traitement des matières organiques : Longueuil sur le point de choisir Varennes. *La Presse*. Repéré à <https://www.lapresse.ca/actualites/grand-montreal/201901/30/01-5212834-traitement-des-matieres-organiques-longueuil-sur-le-point-de-choisir-varennes.php>

- Lewandowski, S. (2016). Ethylene- global : Asia chemical conference. Repéré à <https://cdn.ihs.com/www/pdf/Steve-Lewandowski-Big-Changes-Ahead-for-Ethylene-Implications-for-Asia.pdf>
- Licht, F.O. (2018). World ethanol production to expand steadily in 2019. Repéré à <https://knect365.com/energy/article/c07f7fba-48fa-464f-9f21-12f913fc67f7/world-ethanol-production-to-expand-steadily-in-2019>
- Lifset, R. et Graedel, T. E. (2002). *Industrial Ecology : Goals and Definitions*. Planet botany. Repéré à http://planet.botany.uwc.ac.za/nisl/ESS/Documents/Industrial_Ecology_Overview.pdf
- Livebunkers. (s. d.) Types of fuels used in ships (bunker, bunkering). Repréré à <http://livebunkers.com/types-fuels-used-ships-bunker-bunkering>
- Logsdon, J.E. (2004) Éthanol. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. États-Unis Wiley
- Make-biodiesel.org. (2019) Learn how to make your own biodiesel at home. Repéré à <http://www.make-biodiesel.org/>
- Maritime connector. (s. d.). Ship sizes. Repéré à <http://maritime-connector.com/wiki/ship-sizes/>
- Markets Insider. (2019). Ethanol price commodity. Repéré à <https://markets.businessinsider.com/commodities/ethanol-price>
- Martel, M-E. (2018, 28 mai). Biométhanisation : » Le défi était grand ». La Voix de l'Est. Repéré à <https://www.lavoixdelest.ca/actualites/biomethanisation---le-defi-etait-grand--f12605bd4a24ed819da841528419a829>
- Meadows, D.H., Meadows, D.I., Randers, J., Behrens, W.W. (1972). *The Limits to Growth : A Report to The Club of Rome* (1972)
- Mendow, G., Veizaga, N.S., Sanchez, B.S., Querini, C.A. (2012). Biodiesel production by two-stage transesterification with ethanol by washing with neutral water and water saturated with carbon dioxide. *Bioresource Technology*, 118, 598-602
- Merriam-Webster : dictionnaire. (s. d.) Exportability. Repéré à <https://www.merriam-webster.com/dictionary/export>
- Ministère de l'Environnement et Lutte contre les changements climatiques. (2019). Programme de traitement des matières organiques par biométhanisation et compostage. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/programmes/biomethanisation/>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2014 a, 31 janvier). Communiqué de presse : MRC de la Vallée-du-Richelieu, de Marguerite-d'Youville et de Rouville - Mise en place d'installations de biométhanisation : bientôt une réalité. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/infuseur/communique.asp?No=2772>
- Ministère du Développement durable, de l'Environnement et de la Lutte contre les changements climatiques. (2014 b). Plan d'action 2011-2015 : Bilan de mi-parcours. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/pgmr/bilanMiParcours.pdf>
- Misra-Godwin, D. (2016). Let's go fly a kite – SkySails and climate change. Repéré à <https://digital.hbs.edu/platform-rctom/submission/lets-go-fly-a-kite-skysails-and-climate-change/>

- Mizuno, N., Misono, M. (1997) Heteropolyacid catalysts. *Current opinion in solide state and materials science*, 2(1), 84-89.
- Mondala, A., Liang, K., Toghiani, H., Hernandez, R., French, T. (2008). Biodiesel production by in situ transesterification of municipal primary and secondary sludges. *Bioresource Technology*, 100, 1203-1210
- Monfreda, C., N. Ramankutty, and J.A. Foley. 2008. Farming the planet : 2. Geographic distribution of crop areas, yields, physiological types, and net primary production in the year 2000. Repéré à <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:MaizeYield.png>
- Morrison, L.R. (2000) Glycerol. Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology. États-Unis Wiley
- Nasreen, S., Nafees, M., Qureshi, L.A., Asad, M.S., Sadiq, A., Ali, S. D.(2018). Review of Catalytic Transesterification Methods for Biodiesel Production, Repéré à <https://www.intechopen.com/books/biofuels-state-of-development/review-of-catalytic-transesterification-methods-for-biodiesel-production>
- Natural Resources Canada. (2018). Biodiesel. Repéré à <https://www.nrcan.gc.ca/energy/efficiency/energy-efficiency-transportation-and-alternative-fuels/alternative-fuels/biofuels/biodiesel/3509#a4>
- Nuckle, J. (2017). *Analyse du potentiel durable de la symbiose industrielle comme stratégie de déploiement régional de l'économie circulaire au Québec*. (Essai de maîtrise, Université de Sherbrooke, Sherbrooke, Québec). Repéré à https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/11574/Nuckle_Joany_MEnv_2017.pdf?sequence=4&isAllowed=y
- Nur, S.H., Ayub, M.S., Zalizawati, A. (2014). *Ethanol production via direct hydration of ethylene : a review*. International conference on global sustainability and chemical engineering. Faculté d'ingénierie chimique, Universiti Teknologi Mara, Selangor, Malaisie
- Observatoire de la consommation responsable. (2018). *Baromètre de la consommation responsable*. Repéré à https://ocresponsable.com/wp-content/uploads/2018/11/BCR_2018.pdf
- Oiltanking. (2015). Important terms from A to Z : Heavy fuel oil. Repéré à <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/details/term/heavy-fuel-oil-hfo.html>
- Oiltanking. (s. d.) Important terms from A to Z : Marine diesel oil (MDO) & intermediate fuel oil (IFO). Repéré à <https://www.oiltanking.com/en/news-info/glossary/details/term/marine-diesel-oil-mdo.html>
- Oleoline. (2018). *Glycerine market report*. Repéré à <http://www.hbint.com/datas/media/590204fd077a6e381ef1a252/sample-quarterly-glycerine.pdf>
- Olivier, M. (2016). Capsule 8.5. Dans Olivier, M., *Chimie de l'environnement* (2^e, p. 320)
- Olivier, M. (2019). Échanges téléphoniques et écrits à de multiples occasions.
- Paquette, C. (2018, 13 septembre). Un premier festival sur la décroissance à Montréal. Gaïa presse. Repéré à <https://www.gaiapresse.ca/2018/09/premier-festival-decroissance-a-montreal/>
- Paquin, R. L. et Howard-Grenville, J. (2012). The Evolution of Facilitated Industrial Symbiosis, *Journal of Industrial Ecology*, 16 (1), 2012, p. 83-93.

- Parker, M., Paton, L. (2017, 3 mai). Crooks are after the grease from your french fries. *Bloomberg*. Repéré à <https://www.bloomberg.com/news/articles/2017-05-03/grease-heists-turn-gross-goo-to-gold-for-crooks-in-biofuel-rally>
- Parker, S. (2019). LNG is the ideal “transition fuel”. Repéré à https://www.lngworldshipping.com/news/view,lng-is-the-ideal-transition-fuel_56324.htm?cid=15046
- Patel, N.K., Shah, S.N. (2015). Biodiesel from plant oils. *Food, energy and water*. 277-307.
- Pêches et Océans Canada. (2016). *Signes conventionnels, abréviations et termes utilisés sur les cartes marines*. Repéré à <http://www.charts.gc.ca/documents/publications/Chart-1-April-30.pdf>
- Pêches et Océans Canada. (2019). Instructions nautiques ATL 112 : Fleuve Saint-Laurent Cap-Rouge à Montréal et rivière Richelieu.
- Pokoo-Aikins G., Heath A., Mentzer R.A., Mannan M.S., Rogers W.J., El-Halwagi, M.M. (2010). A multi-criteria approach to screening alternatives for converting sewage sludge to biodiesel. *Journal of loss prevention in the process industries*, 23, 412-420
- Rapier, R. (2019, 11 aout). The problem with the ethanol industry. *Forbes* Repéré à <https://www.forbes.com/sites/rpapier/2019/08/11/this-is-what-is-wrong-with-the-ethanol-industry/#77460c2017b8>
- Rapier, R. (2019, 15 aout). How to fix the ethanol industry. *Forbes*. Repéré à <https://www.forbes.com/sites/rpapier/2019/08/15/how-to-fix-the-ethanol-industry/#6f3608bc7756>
- Recyc-Québec. (2017). *Fait saillants des résultats de l'analyse de cycle de vie environnementale et économique des sacs d'emplettes*. Repéré à <https://www.recyc-quebec.gouv.qc.ca/sites/default/files/documents/acv-sacs-emplettes-faits-saillants.pdf>
- Registraire des entreprises Québec. (2019). Numéro de dossier 1147028642.
- Ressources naturelles Canada. (2015). Biodiésel – Avantages. Repéré à <https://www.rncan.gc.ca/energie/carburants-remplacement/carburants-faits/biodiesel/3514>
- Rothsay. (2019). Graisse & huiles. Repéré à <https://www.rothsay.ca/fr/produits/grasses-huiles>
- Runge, F. C. (2016). The case againse more ethanol : it's simply bad for the environment. Repéré à https://e360.yale.edu/features/the_case_against_ethanol_bad_for_environment
- Sagan, A. (2019, 6 juin). Les consommateurs disent oui à la réduction du plastique, mais non à la facturation. *Le Devoir*. Repéré à <https://www.ledevoir.com/societe/environnement/556118/les-consommateurs-disent-oui-a-la-reduction-du-plastique-mais-non-a-la-facturation>
- Saint-Laurent Vision 2000. (1996). Fiche 23 : Pétrumont inc. Repéré à http://publications.gc.ca/collections/collection_2016/eccc/En153-6-23-1996-fra.pdf
- Sanimax. (2019). Un engagement envers la qualité : graisses et huiles de Sanimax. Repéré à <https://sanimax.ca/agriculture-et-nutrition-animale/grasses-huiles/>
- Seider, W.D., Seader, J.D., Lewin, D.R. (2004). *Product & process design principles : Synthesis, analysis and evaluation* (2e). États-Unis : Wiley
- Selenis Canada. (2019). Page d'accueil. Repéré à <http://www.seleniscanada.com/>

- Ship&bunker. (2019). Bunker prices. Repéré à <https://shipandbunker.com/prices/emea/nwe/nl-rtm-rotterdam#LSMGO>
- SNC-Lavalin. (2017). *Agrandissement du terminal portuaire de Contrecœur : Étude d'impact environnemental* (Rapport principal, volume 1).
- Société de développement économique Rivière-des-Prairies Pointe-aux-Trembles Montréal-Est. (2011). Bulletin de veille sectorielle portant sur l'est de Montréal et ses industries : édition spéciale chimie pétrochimie. *Est industriel info*.
- Solinov. (2013). *Portrait du gisement des matières organiques de l'industrie agroalimentaire au Québec et estimation des aliments consommables gérés comme résidus par les ICI de la filière de l'alimentation*. Repéré à <http://www.environnement.gouv.qc.ca/matieres/valorisation/Portrait-gisement-residus-organiques-industrie-agroalimentaire.pdf>
- Sommet de Montréal. (2002). L'industrie pétrochimique québécoise. Repéré à http://ville.montreal.qc.ca/pls/portal/docs/page/SOMMET_FR/MEDIA/DOCUMENTS/Petrochimie.pdf
- Statista. (2019a). Fuel ethanol production worldwide in 2018, by country (in million gallons). Repéré à <https://www.statista.com/statistics/281606/ethanol-production-in-selected-countries/>
- Statista. (2019b). Average age of North American locomotive fleet from 2014 to 2018. Repéré à <https://www.statista.com/statistics/580894/north-american-locomotives-average-age/>
- Stott, P.W., (2012). *Low carbon shipping conference 2012 : New panama and its implications for ship design and efficiency*. School of marine science & technology, Newcastle University, Newcastle, United-Kingdom. Repéré à <https://shippingresearch.files.wordpress.com/2012/09/lcs-2012-paper-paul-stott-revision-a-sept-1012.pdf>
- Synergie Québec. (2019). Carte des symbioses : des projets partout au Québec! Repéré à <https://www.synergiequebec.ca/>
- The Land. (2017, 21 septembre). Palm oil market to keep tallow rates in check. *The Land*. Repéré à <https://www.theland.com.au/story/4937916/tallow-prices-steady-at-680t/?cs=4933>
- The pH Report. (2018). US ethylene prices near all-time lows as over-capacity arrives. Repéré à <http://www.new-normal.com/chemical-companies/us-ethylene-prices-near-all-time-lows-as-over-capacity-arrives/>
- Thomaselli, R. (2015). How old is too old for a commercial airplane? Repéré à <https://www.travelpulse.com/news/impacting-travel/how-old-is-too-old-for-a-commercial-airplane.html>
- Transports Québec. (2019). Électrification des transports. Repéré à https://www.transports.gouv.qc.ca/fr/ministere/role_ministere/electrification/Pages/electrification.aspx
- TVA Nouvelles (2015, 10 octobre). Le rêve de Jean Coutu se concrétise. *TVA Nouvelles*. Repéré à <https://www.tvanouvelles.ca/2015/10/10/le-reve-de-jean-coutu-se-concretise>
- U.S. census bureau. (2019). U.S. census bureau current population. Repéré à <https://www.census.gov/popclock/print.php?component=counter>
- University of Guelph. (s. d.). The chloralkali process. Repéré à <http://www.chembio.uoguelph.ca/educmat/chem7234/Industrial%20Electrochem.pdf>

- Usman, M. (2018). Production of biodiesel from wastewater sludge treatment by direct lipids extraction. *Journal of fundamentals of renewable energy and applications*, 8 (3).
- Valtech A. (s. d.). Material safety data sheet : Ethyl alcohol 95% v/v. Repéré à <http://www.labchem.com/tools/msds/msds/VT230.pdf>
- Valtech B. (s. d.). Material safety data sheet : Methanol. Repéré à <https://www.labchem.com/tools/msds/msds/VT430.pdf>
- Varisli, D., Dogu, T., Dogu, G. (2010). Petrochemicals from ethanol over a W-Si-base nanocomposite bidisper solid acid catalyst. *Chemical engineering science* 65 (1), 153-159
- Vázquez, P., Pizzio, L., Cáceres, C., Blanco, M., Thomas, H., Alesso, E., Finkielstein, L., Lantano, B., Moltrasio, G., Aguirre, J., 2000. Silica-supported heteropolyacids catalysts in alcohol dehydration reactions. *Journal of Molecular Catalysis A : Chemical* 161, 223–232
- Ville de Varennes. (2015a). *Plan d'urbanisme : plan 1*. Repéré à http://ville.varenn.es.qc.ca/sites/default/files/page/BR_Plan_1_PU_Composante_structurante_identitaire_milieu_rural.pdf
- Ville de Varennes. (2015b). *Plan d'urbanisme : plan 2*. Repéré à https://ville.varenn.es.qc.ca/sites/default/files/page/Plan_2_PU_Composante_structurante_identitaire_milieu_urbain_706-10_20160809.pdf
- Ville de Varennes. (s. d.) *Un dynamisme économique unique au Québec*. Repéré à http://www.ville.varenn.es.qc.ca/Publications/Varenn.es_Un_dynamisme_unique_au_Quebec_07-12-06.pdf
- Wikipédia. (s. d.). Diagramme de transformation de l'éthylène. Repéré à <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Ttd-30-5-05-transf-ethylene.jpg>
- Zimmermann, H., Walzl, R. (2000). Ethylene. Ullmann's encyclopedia of industrial chemistry, Wiley-VCH Verlag, Weinheim

ANNEXE 1 – PLANS D'URBANISME DE VARENNES

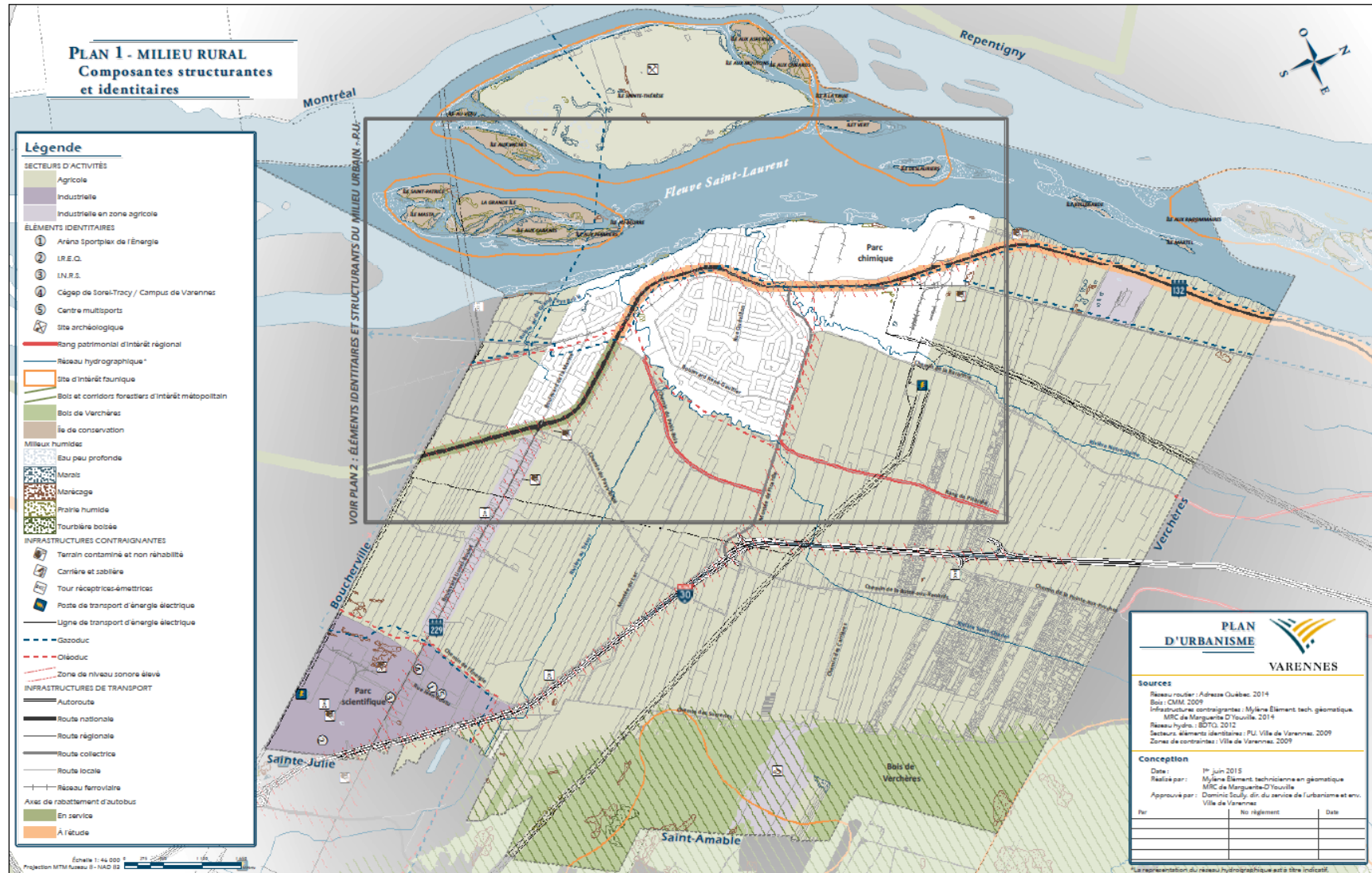


Figure A.1 : Plan d'urbanisme de Varennes; milieu rural (Ville de Varennes, 2015a)

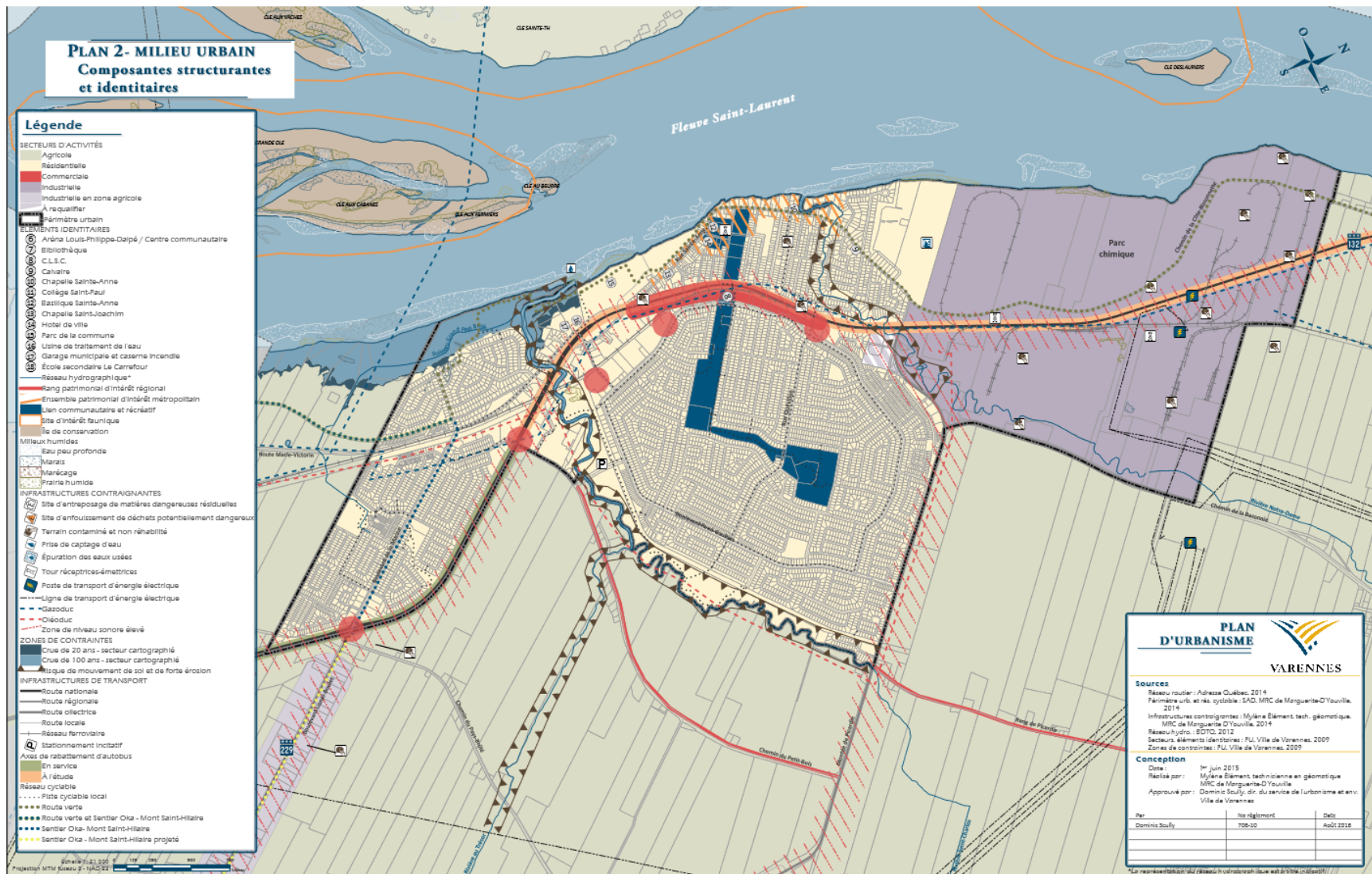


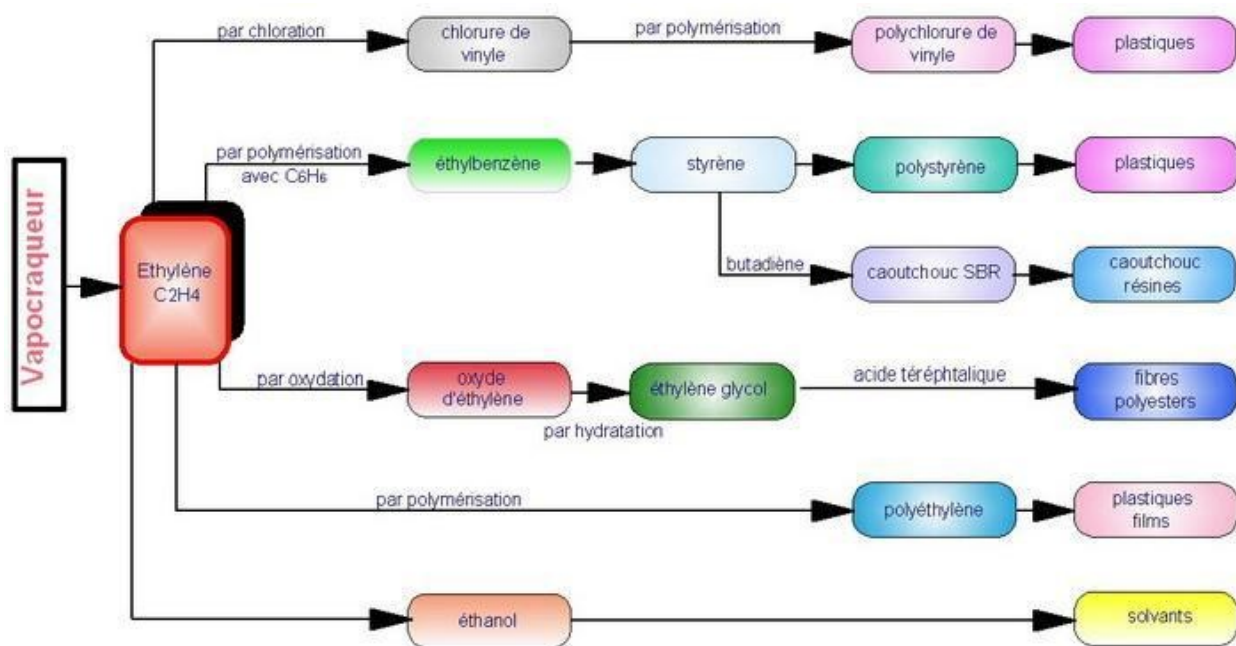
Figure A.2 : Plan d'urbanisme de Varennes; milieu urbain (Ville de Varennes, 2015b)

ANNEXE 2 – AVANTAGES DE LA SYMBIOSE INDUSTRIELLE

Plan	Avantages
Gouvernemental	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire les coûts de la dégradation de l'environnement (coûts de réadaptation et de mesures correctives des externalités); • Diminuer la demande en ressources naturelles; • Réduire la demande sur les infrastructures municipales (station d'épuration des eaux usées, sites d'enfouissements, etc.); • Réduire la séparation des usages entre territoire industriel et résidentiel grâce à la réduction des émissions industrielles.
Technique	<ul style="list-style-type: none"> • Améliorer les pratiques vers des technologies et des procédés de production plus propres; • Optimiser la gestion des matières résiduelles par leur mise en valeur en matières secondaires; • Développer de nouveaux produits à contenu recyclé; • Développer de nouvelles filières de mise en valeur et de nouveaux procédés; • Augmenter le potentiel d'innovation.
Économique	<ul style="list-style-type: none"> • Diminuer les coûts des intrants (ressources et énergie); • Réduire la dépendance aux ressources non renouvelables; • Réduire la dépendance aux ressources provenant de l'étranger; • Abaisser les coûts de production; • Réduire les coûts de disposition ou d'élimination des matières résiduelles (MR) (location conteneur et services de transport); • Augmenter les profits en attribuant aux déchets une nouvelle valeur économique; • Éviter les coûts d'éventuelles amendes pour non-conformité aux réglementations environnementales; • Permettre la création de nouveaux produits; • Mise en place de nouvelles industries pour répondre aux nouveaux besoins de la valorisation des déchets • Augmenter la compétitivité sur les marchés internationaux; • Augmenter les revenus des entreprises par la vente de leur MR; • Rentabilité de l'investissement; • Créer de nouveaux partenariats d'affaires; • Gérer les risques et les opportunités efficacement; • Augmenter les ramifications du tissu industriel

Environnemental	<ul style="list-style-type: none"> • Réduire l'exploitation des matières premières et des ressources non renouvelables; • Allonger le cycle de vie des ressources; • Encourager le développement et le recours aux énergies renouvelables et aux technologies propres; • Réduire les émissions de gaz à effet de serre (GES) des industries et la pollution subséquente; • Diminuer la quantité de déchet envoyée à l'enfouissement et par le fait même la quantité de gaz à effet de serre émit par ces lieux; • Respecter les normes environnementales (émissions seuils de polluants et de déchets); • Permettre un développement durable du territoire; • Respecter la capacité de charge de l'environnement; • Permettre l'atteinte des objectifs de la Politique québécoise de gestion des matières résiduelles
Culturel et social	<ul style="list-style-type: none"> • Créer de nouvelles opportunités d'emplois notamment dans le domaine de la gestion des ressources locales et de la valorisation des déchets; • Créer de nouvelles opportunités d'affaires; • Augmenter la coopération et la participation des industries de différents secteurs; • Resserrer les liens d'affaires avec les entreprises et les organismes locaux de développement; • Permettre un meilleur dialogue avec les parties prenantes : meilleure connaissance de leurs préoccupations, de leurs besoins et de leurs attentes; • Améliorer l'image de marque de la partie prenante ainsi que de l'acceptabilité sociale; • Sensibiliser aux 3RV, à l'écologie industrielle et au développement durable.

ANNEXE 3 – ÉTHYLÈNE



TRANSFORMATION DE L'ÉTHYLÈNE

Figure C.1 : Diagramme de transformation de l'éthylène (tiré de Wikipédia, s. d.)

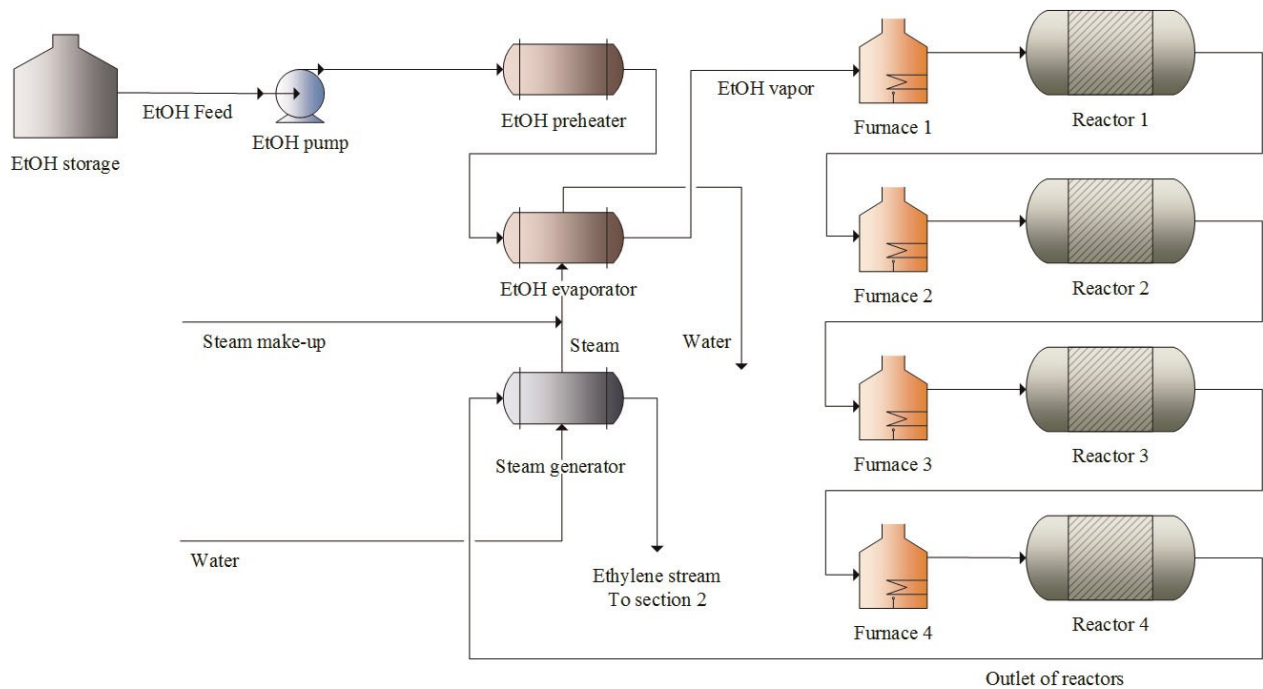


Figure C.2 : Simulation d'un procédé de déshydratation de l'éthylène pour en faire de l'éthanol (tiré de Mohsenzadeh et al., 2017)

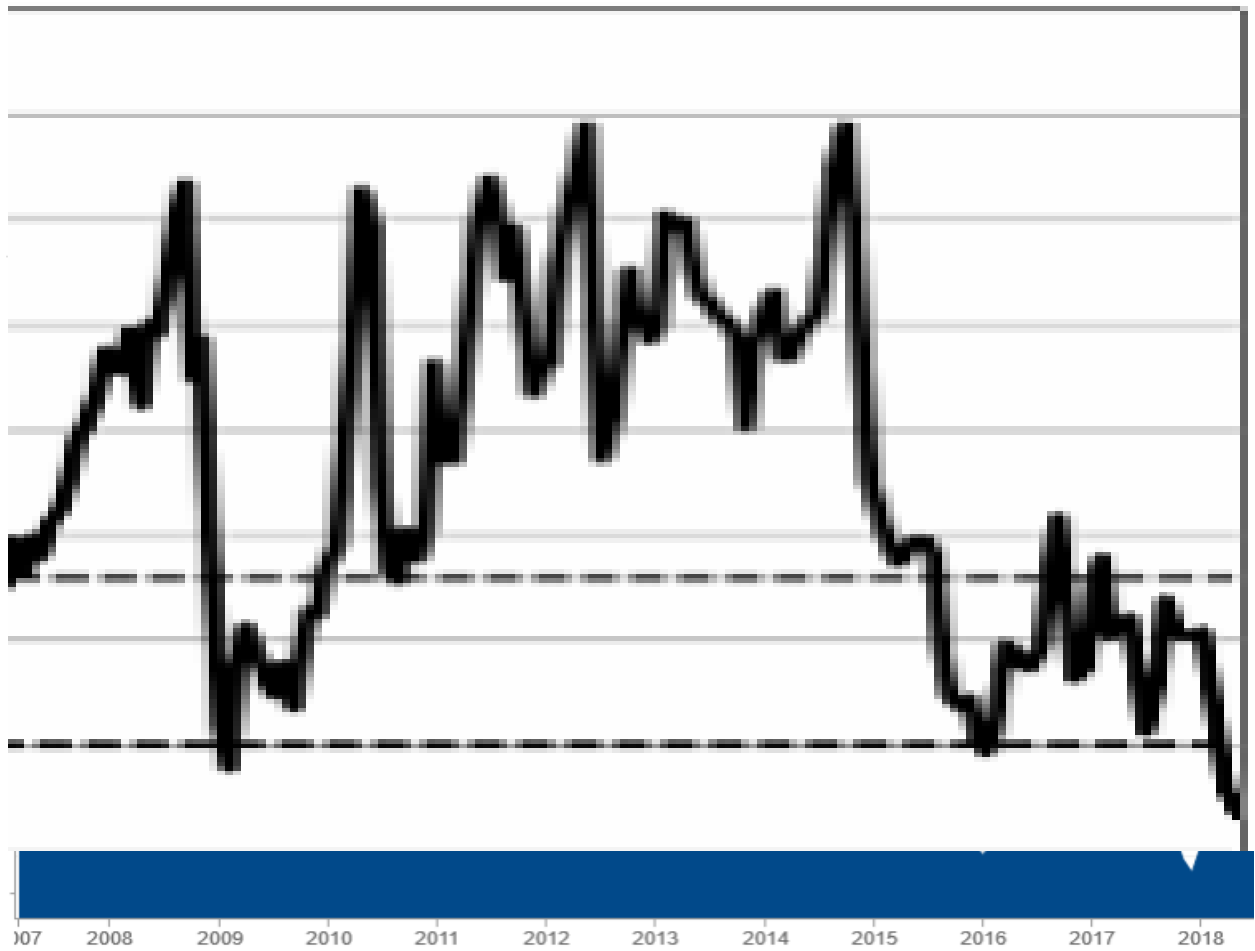


Figure C.3 : Superposition des tendances des prix de l'éthanol et de l'éthylène

ANNEXE 4 – MATIÈRES RÉSIDUELLES DE L'INDUSTRIE AGROALIMENTAIRE

Tableau D.1 : Estimation des quantités de résidus organiques générées par l'industrie agroalimentaire du Québec (tiré de Solinov, 2013)

Code SCIAN	Groupes d'activité	Base de données		Taux de production	Quantité générée	Quantité par mode de gestion				
						Alimentation humaine	Alimentation animale et équarrissage	Traitement biologique	Traitement thermique	Enfouissement
		Entreprises	Employés	t/employé/an	tonnes/an	tonnes/an	tonnes/an	tonnes/an	tonnes/an	tonnes/an
3111	Fabrication d'aliments pour animaux	99	2 511	1,8	4 568	0	1 936	248	0	2 383
3112	Mouture de céréales et de graines oléagineuses	26	598	0,7	409	0	1	328	80	0
3113	Sucre et confiseries	74	2 580	4,1	10 682	18	105	5 271	0	5 288
3114	Mise en conserve de fruits et de légumes et fabrication de spécialités alimentaires	75	5 225	35,2	184 143	3	123 673	55 690	0	4 777
3115	Fabrication de produits laitiers	103	8 930	29,7	264 972	29	232 631	30 216	0	2 096
3116	Fabrication de produits de viande	179	17 263	31,8	548 231	111	337 677	202 625	7 506	311
3117	Préparation et conditionnement de poissons et de fruits de mer	55	3 628	4,9	17 942	0	34	13 517	0	4 391
3118	Boulangeries et fabrication de tortillas	272	9 770	9,1	88 792	441	86 769	1 263	15	304
3119	Fabrication autres aliments	321	9 377	5,3	49 813	1 397	32 334	5 609	0	10 473
312	Fabrication de boissons et de produits du tabac	152	6 923	16,8	116 635	0	112 517	2 423	0	1 695
	Sous-total - SOLIDE				795 496	1 999	677 821	77 094	7 601	30 982
	Sous-total - LIQUIDE				490 691	0	249 858	240 097	0	736
	TOTAL	1 356	66 805	N/A	1 286 188	1 999	927 678	317 191	7 601	31 718